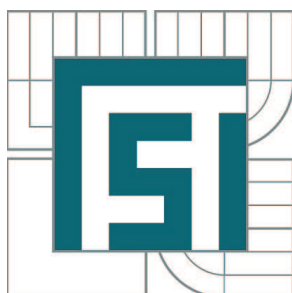


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO**  
**INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## **NEKONVENČNÍ VYUŽITÍ VĚTRNÉ ENERGIE**

NONCONVENTIONAL UTILISATION OF WIND ENERGY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JOSEF ZAJÍC**

**VEDOUČÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JAROSLAV JÍCHA, CSc.**

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Josef Zajíc

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Nekonvenční využití větrné energie**

v anglickém jazyce:

### **Nonconventional Utilisation of Wind Energy**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Produkce vodíku elektrolyzou vody se zdrojem elektrické energie generované větrnými elektrárnami.

Cíle bakalářské práce:

Komentovaná rešerše s podrobným popisem základních parametrů zvolené technologie.

Seznam odborné literatury:

LUTCHA, J. Špičková elektrárna s ukládáním větrné energie do stlačeného vzduchu v kaverně a modifikovanou plynovou turbinou s generátorem. Brno, 20. 2. 2007

G-Team, UNIS, ČVUT, KG Process Innovations. Výzkum a vývoj soustavy zařízení pro konverzi biomasy na energii spojeného se zásobníky větrné energie uložené ve formě stlačeného vzduchu. 12. 7. 2005

ŠVÁB, M. Trendy ve vývoji Vodíkového hospodářství ve světě a možnosti uplatnění v České republice. ENVIROS, s.r.o., Česká energetická agentura, 2006

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 25.10.2010

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá využitím energie větru jako zdroje energie pro výrobu vodíku. V první části jsou popsány typy větrných motorů se zaměřením především na vrtulové větrné motory a jejich konstrukci. Následuje popis problematiky spotřeby elektrické energie závislý na čase a s ním spojená problematika akumulace elektřiny pomocí různých metod. Závěrná část práce je pak věnována statistickému vyhodnocení větrných podmínek, popisu a návrhu zařízení vodíkového hospodářství.

## **Abstract**

The thesis considers utilization of the wind energy as source of energy for the production of hydrogen. In the first part, there is described the types of wind engine specialized especially on screw wind engines and their construction. After that follows the description of dilemmas usage of electric energy addicted in time and with it connected problems with accumulation electricity by the help of various methods. The final part of the thesis is than addicted to statistic evaluation of wind conditions, description and suggestion of the equipment hydrogen management.

## **Klíčová slova**

Větrná elektrárna, energetické špičky, akumulace, setrvačnick, superkondenzátor, SMES, CAES, vodík, elektrolýza, Weibullovo rozdělení, elektrolyzér, palivový článok.

## **Key words**

Wind turbine, energy peak, accumulation, flywheel, supercapacitor, SMES, CEAS, hydrogen, electrolysis, Weibull, electrolyzer, fuel cell.

## **Bibliografická citace**

ZAJÍC, J. Nekonvenční využití větrné energie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně. Všechny literární prameny a informace, které jsem v práci použil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Tímto děkuji panu doc. Ing. Jaroslavovi Jíchovi, CSc. za poskytnutí cenných informací a vedení bakalářské práce. Dále pak svým rodičům za podporu během celého studia.

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>12</b>
<b>2. Typy větrných motorů.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Odporové větrné motory .....</b>	<b>14</b>
2.1.1. Savoniův rotor .....	14
<b>2.2. Vztlakové větrné motory .....</b>	<b>15</b>
2.2.1. Vrtulová VTE .....	15
2.2.2. Darrieova turbína.....	16
<b>2.3. Netradiční typy elektráren .....</b>	<b>16</b>
2.3.1. Létající elektrárny .....	16
2.3.2. Piezoelektrické elektrárny .....	17
2.3.3. Maglev .....	17
2.3.4. Aerogenerátor .....	17
<b>3. Vrtulové VTE rozdělení podle velikosti a konstrukce .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1. Rozdělení podle výkonu .....</b>	<b>18</b>
3.1.1. Malé větrné elektrárny .....	18
3.1.2. Střední a velké větrné elektrárny.....	18
3.1.3. Větrné parky .....	18
<b>3.2. Rozdělení podle konstrukce.....</b>	<b>19</b>
3.2.1. Stožáry VTE .....	19
3.2.2. Uspořádání strojovny .....	20
3.2.3. Systém regulace.....	20
<b>4. Spotřeba elektrické energie v závislosti na čase. Energetické špičky... 22</b>	
4.1. Historický růst spotřeby elektrické energie .....	22
4.2. Průběh spotřeby elektrické energie v jednotlivých týdnech roku .....	22
4.3. Denní spotřeba elektrické energie, energetické špičky .....	24
4.4. Predikce spotřeby elektřiny v ČR.....	25
<b>5. Možnosti akumulace větrné energie .....</b>	<b>27</b>
5.1. Přečerpávací vodní elektrárna .....	27
5.2. Setrvačnickové akumulátory .....	29
5.3. Supravodivé indukční akumulátory .....	30
5.4. Elektrochemické akumulátory .....	30
5.4.1. Olověný akumulátor .....	30
5.4.2. Pokročilé chemické akumulátory .....	31
5.5. Superkondenzátory .....	32
5.6. Tlakovzdušná akumulace .....	33
5.7. Tepelné akumulátory .....	33
<b>6. Vodík a vodíková akumulace .....</b>	<b>35</b>
6.1. Vlastnosti a výroba vodíku .....	35
6.2. Elektrolýza vody .....	35
6.3. Skladování vodíku .....	36

<b>6.4.</b>	<b>Přeprava a distribuce vodíku .....</b>	<b>36</b>
<b>6.5.</b>	<b>Stanice pro výrobu vodíku .....</b>	<b>37</b>
<b>6.6.</b>	<b>Přehled sestav zařízení.....</b>	<b>37</b>
6.6.1.	Výroba vodíku pouze elektřinou z VTE .....	37
6.6.2.	Výroba vodíku elektřinou z VTE s pomocí sítě .....	38
6.6.3.	Výroba vodíku s kombinovanou dodávkou elektřiny do rozvodné sítě .....	38
6.6.4.	Výroba vodíku pro akumulaci elektrické energie .....	38
6.6.5.	Integrovaná výroba vodíku a elektřiny .....	38
<b>6.7.</b>	<b>Hlavní komponenty sestavy .....</b>	<b>39</b>
6.7.1.	Větrná turbína.....	39
6.7.2.	Napěťová regulace a řídicí jednotka .....	39
6.7.3.	Elektrolyzér .....	39
6.7.4.	Zásobník .....	40
6.7.5.	Palivový článek .....	40
<b>7.</b>	<b>Statistické vyhodnocení rychlosti větru a výpočet větrného výkonu....</b>	<b>42</b>
7.1.	Statistické vyhodnocení.....	42
<b>8.</b>	<b>Vlastní návrh zařízení .....</b>	<b>47</b>
8.1.	Schéma sestavy a volba komponentů .....	47
8.2.	Ekonomika .....	48
<b>9.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>49</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>51</b>
<b>11.</b>	<b>Seznam symbolů .....</b>	<b>54</b>
<b>12.</b>	<b>Seznam zkratek.....</b>	<b>55</b>



# 1. Úvod

Zařazením obnovitelných zdrojů energie do energetického komplexu s sebou přináší řadu problémů, ať už s proměnlivým výkonem aparátů, ekonomickou návratností nebo pohledem obyvatel. Tento krok by však měl vést k snižování závislosti na fosilních palivech, tedy i tepelných elektrárnách spalujících uhlí. Opomenout nesmíme ani dopravní průmysl, ve kterém dnes jako palivo převládají fosilní paliva (benzin, nafta), jejichž spalováním dochází ke znečišťování životního prostředí.

V první části práce jsou popsány jednotlivé užívané větrné motory. Jsou zmíněny větrné elektrárny (VTE) pracující na odporovém i vztakovém principu a udány jejich výhody i nevýhody. Neopomenuty nezůstanou ani nejmodernější elektrárny, jejichž cesta k možnému úspěchu je teprve na samotném začátku. Práce se zabývá především velkými VTE, které poskytují možnost vyšších výkonů, a tedy přímého spojení s produkcí vodíku jako alternativního paliva v dopravě a hodnotného nosiče energie. Dnešní trh nabízí i velké množství mikroelektráren vhodných k různým aplikacím, například jako doplňkové zdroje pro rodinné domy. Této skupině elektráren se však práce nevěnuje.

Problematika nasazení VTE je, že nedovedou podávat námi požadovaný výkon tehdy, kdy chceme. Jsme silně závislí na přírodních podmínkách. Další problém, kterému se práce věnuje, spočívá v popisu stavu spotřeby elektrické energie nejen v krátkých časových úsecích jednoho dne, ale poskytuje pohled na meziroční srovnání spotřeby elektřiny v České Republice. Nedílnou částí v denním zatížení rozvodné sítě jsou nárazové odběry elektřiny, tedy energetické špičky.

Pokud vyžadujeme nepřetržitý výkon aparátu, či eliminaci energetických špiček, nezbyvá jiné řešení, než použití nějaké formy akumulace energie. V této práci je popsáno velké množství forem možné akumulace, převážně vhodných pro VTE. Jsou zmíněny klasické olověné baterie, přečerpávací vodní elektrárny, setrvačníky, supravodiče, superkondenzátory, tlaková akumulace a v neposlední řadě nejvíce zde rozvedená podstata akumulace vodíkové.

Vodík jako výborný nosič energie nabízí řešení spojené s připojováním nepředvídatelného výkonu k síti. Vodík lze vyrábět mnohými způsoby s ohledem na ekologii, VTE i spotřebu fosilních paliv. Zde se budeme zabývat jen elektrolytickým rozkladem vody.

Pro navržení stanice výroby vodíku bude zapotřebí nejprve statisticky vyhodnotit větrné podmínky pro danou lokalitu a rentabilitu budoucího systému.



## 2. Typy větrných motorů

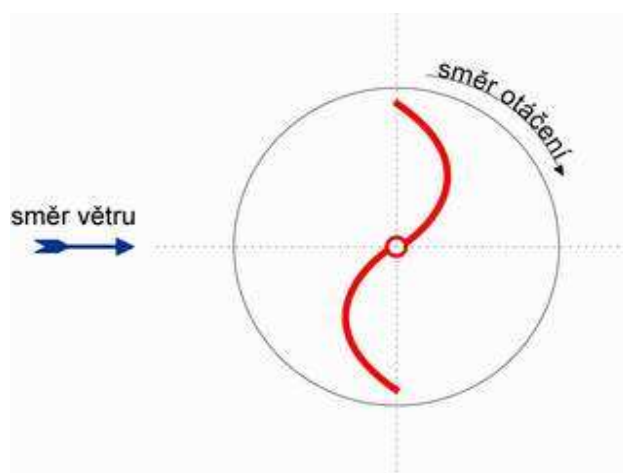
Existují různá kritéria, podle kterých je možné větrné motory rozdělovat. Nejčastějším, základním hlediskem je dělení podle aerodynamiky na odporové a vztlakové. Dále se pak rozlišují rotory s horizontální osou rotace, někdy těž označované jako vrtulové, nebo vertikální osou rotace, mnohdy známé pod pojmem rotorové. Zastoupení jednotlivých typů a druhů na dnešním trhu je vzhledem k oblasti použití různorodé. Pro velkou energetiku však převládají rotory vztlakové s horizontální osou rotace.

### 2.1. Odporové větrné motory

Princip těchto motorů spočívá v kladení odporu působícímu větru pomocí ploch připevněných k rotační ose. Vítr působící na plochy vytváří sílu, která má snahu osu roztáčet. Typickým představitelem je tzv. Savoniův rotor.

#### 2.1.1. Savoniův rotor

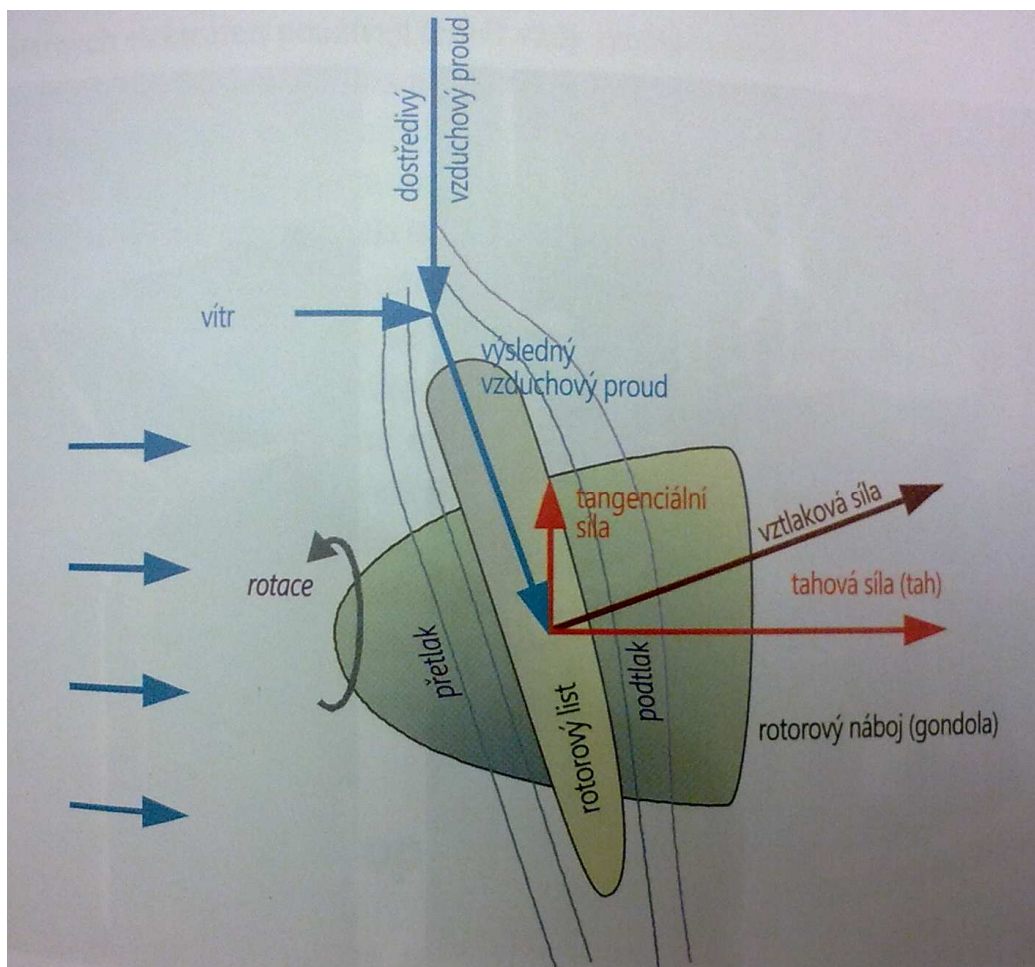
Rotor vynalezl Fin Sigurd Johannes Savonius kolem roku 1925. Je tvořen dvěma deskami, mezi které jsou umístěny lopatky. Při pohledu shora lopatky připomínají písmeno S. Lopatky jsou uprostřed o nějakou část přesazeny, což vede k efektivnějšímu využití působícího větru. Náběhová rychlost se pohybuje okolo  $2 \text{ m.s}^{-1}$ . Jedná se o rotor s vertikální osou rotace užívaný k čerpání vody, výrobě elektrického proudu o malém výkonu, nebo jako Flettnerův ventilátor. Později se rotor začal používat jako průtažný, jenž obsahoval větší počet lopatek. Dalším zlepšením jsou lopatky ve tvaru šroubovice, které zajišťují hladký průběh otáčení. Výhody Savoniových rotorů jsou jednoduchá stavba celého zařízení, nezávislost na směru větru, čímž odpadá natáčení rotoru na směr větru, jak je tomu u rotorů vrtulových, možnost spojovat více rotorů sériově nebo paralelně, umístění nízko nad zemí, relativně tichý chod a vysoká odolnost proti bouřím při správném provedení. Savoniův rotor má jako každé technické zařízení i své nevýhody. Jednou z nich je malá rychloběžnost daná hlavně malým průměrem rotoru, který rotoru dává relativně nízké otáčky a vysoké točivé momenty. K dalším patří relativně malá účinnost, maximálně 20 % [1].



Obr. 1: Princip činnosti Savoniova rotoru[2].

## 2.2. Vztlakové větrné motory

Funkce vztlakových větrných motorů bude vysvětlena na vrtulové VTE. Lopatky (listy) vztlakového rotoru musí mít v každém případě v řezu vztlakový profil, na který pod vhodným úhlem náběhu působí výsledný vzduchový proud, jak je patrné z obr. 2. Obtékající proud vzduchu kolem listu motoru vytváří rozdílné tlaky a rychlosti proudění na jeho horní a spodní straně. Takto vzniká vztlaková síla, která se skládá ze dvou složek, tangenciální a tahové. Rotaci rotoru způsobuje síla tangenciální. Tahová síla nemá žádné využití, pouze namáhá listy rotoru na ohyb.



Obr. 2: Funkční princip vztlakové vrtulové elektrárny [3].

### 2.2.1. Vrtulová VTE

Nejrozšířenějším typem VTE na výrobu elektrické energie jsou vrtulové elektrárny s horizontální osou rotace. Po letitých zkušenostech a experimentech s počtem listů na náboji vrtule se dospělo k závěru, že optimální jsou vrtule třílisté, které disponují nejlepšími parametry. Náběhová rychlost těchto turbín je od  $3 \text{ m.s}^{-1}$  a zastavují se při rychlostech nad  $25 \text{ m.s}^{-1}$ , to proto, aby nedošlo k poškození celého díla, ba dokonce jeho zhroutení vlivem rozkmitání konstrukce. Optimální rychlost větru, pro kterou jsou často navrhovány pro vnitrozemí, se pohybuje okolo  $13 \text{ m.s}^{-1}$ . Těmto typům VTE bude věnována větší pozornost v dalších částech této práce. Jedná se totiž o moderní VTE, v současné době nejvíce využívané pro výrobu elektrické energie i následnou produkci vodíku.

### 2.2.2. Darrieova turbína

Turbínu patentoval v roce 1931 francouzský inženýr Georges Jean Marie Darrieus. Pracuje na vztakovém principu s vertikální osou rotace, což umožňuje dosahovat vyšších rychlostí otáčení a tedy vyšší účinnosti. Slouží především k výrobě elektrické energie. Turbíny s vertikální osou rotace jsou více dynamicky namáhány, což snižuje jejich životnost. Účinnost Darrierovi turbíny se pohybuje kolem 37 %. Nabíhání se dříve provádělo pomocí Savoniova rotoru. Existuje několik variant a provedení, ale v praxi nedosáhly velkého rozšíření.



Obr. 3: Darrieova turbína [4].

## 2.3. Netradiční typy elektráren

V této části bych se chtěl zmínit o větrných elektrárnách, které jsou na samém počátku svého vývoje. Mnohé z nich jsou zatím jen teoretickými pracemi a počítačovými simulacemi. Jiné prototypy jsou však již testovány nebo i nabízeny investorům ke koupi. Rychlý rozvoj větrné energie je nakloněn brzkým realizacím těchto projektů nebo vynalézání a zdokonalování jiných technologií.

### 2.3.1. Létaající elektrárny

Jedná se o elektrárny vznášející se v relativně vysokých vzdálenostech od zemského povrchu (stovky metrů). V těchto výškách je proudění vzduchu daleko vydatnější. Se zemí je spojuje dlouhý vodič, kterým prochází vygenerovaný proud. Výhody takovýchto elektráren spočívají v nízkých nákladech a tedy i v ceně vyrobené elektřiny, která je několikanásobně menší než u běžných sloupových větrných elektráren. Další výhodou je možnost použití zařízení v různých terénech a oblastech a jednoduché a rychlé uvedení do provozu. Nevýhodou je například nutnost skloubit elektrárnu s leteckým provozem.

Jedním prototypem je tzv. MARS (Magenn Air Rotor System). Elektrárna pracuje na odporovém principu s horizontální osou rotace, jak je možné vidět na obr. 4. Balón napuštěný heliem je spojen se zemí pomocí vodiče, kterým prochází vyrobený proud. Po obvodu balónu jsou lopatky tvořené plachtami. Jejich úlohou je otáčet celým zařízením a generátorem umístěným v ose balónu vyrábět elektřinu. Zahájení výroby je plánováno na rok 2010–2011.



*Obr. 4: Létající elektrárna MARS [5].*

### **2.3.2. Piezoelektrické elektrárny**

Tyto elektrárny využívají piezoelektrického jevu, kdy stlačováním či deformací speciální hmoty vzniká elektrické napětí. Jeden z konceptů spočívá ve vztyčení dutých vysokých uhlíkových vláken, ve kterých jsou zabudovány piezoelektrické keramické disky. Poryvy větru mají tyto vlákna rozpohybovat a tím vytvářet elektrickou energii. Taková VTE byla navržena americkými inženýry pro město Masdar ve Spojených Arabských Emirátech, její realizace ovšem není jistá.

### **2.3.3. Maglev**

Maglev je dalším z možných představitelů větrných turbín budoucnosti. Jejím vynálezcem je Američan Ed Mazur. Celý princip je založen na magnetické levitaci známý z japonských, čínských nebo německých rychlovlaků. Větrná turbína s vertikální osou otáčení plave na magnetickém polštáři a pomocí lineárního synchronního motoru vyrábí elektrickou energii. Odpadají tak ztráty vzniklé třením v ložiscích, turbína se může otáčet i při malých rychlostech větru (od  $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ ). Monstrózní stavba o velikosti až 2 GW se zatím nedočkala žádné realizace. Výrobce referuje nízké provozní náklady a v porovnání s běžným typem VTE nízkou cenu vyrobené elektrické energie, přesto jsou pořizovací náklady příliš vysoké.

### **2.3.4. Aerogenerátor**

Prototyp pobřežní VTE s vertikální osou rotace o velikosti až 9 MW byl představen již v roce 2008. Nyní tým vědců z Británie pracuje na novém prototypu podobnému Aerogenerátoru X s rozpětím ramen 275 m. Přínosem těchto staveb jsou klasické výhody rotorů s vertikální osou otáčení, hlavně nízko položené těžiště (generátor s převodovkou jsou ve spodní části) a nepotřebné natáčení na směr větru. Testování VTE je plánováno v letech 2013–2014. Využívání energie větru při pobřeží je velkým trendem posledních let, proto mohou mít tato a podobná zařízení světlou budoucnost.

### 3. Vrtulové VTE rozdělení podle velikosti a konstrukce

#### 3.1. Rozdělení podle výkonu

Velikostí VTE se rozumí výkon. Ten lze spočítat součinem energie větru pro danou velikost vrtule s účinností celé elektrárny (vrtule, převodovka, generátor). VTE mohou fungovat v tzv. ostrovním provozu, kdy vyrobená elektrická energie je využívána v místě výroby bez využití přenosové sítě. V tomto jsou dominantní převážně VTE malých výkonů.

Větrné elektrárny								
malé			střední			velké		
vrtule		výkon do kW	vrtule		výkon do kW	vrtule		výkon do kW
průměr [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]		průměr [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]		průměr [m]	plocha [m <sup>2</sup> ]	
≤ 8	≤ 50	10	16,1- 22	200,1-400	130	45,1- 64	1600,1- 3200	1500
8,1-11	50,1-100	25	22,1- 32	400,1-800	310	64,1- 90	3200,1- 6400	3100
11,1-16	100,1- 200	60	32,1- 45	800,1- 1600	750	90,1- 128	6400,1- 12800	6400

Tab. 1: Kategorizace větrných elektráren na malé, střední a velké (podle Endera, 2006) [6].

##### 3.1.1. Malé větrné elektrárny

Pokud budeme vycházet z tabulky tab. 1, půjde o turbíny s výkonem menším než 60 kW. Jsou to především mikrozdroje s výkonem zhruba do 2–2,5 kW a průměrem vrtule od 0,5 do 3 m, které jsou výhradně určeny k dobíjení baterií. Zařízení obvykle pracují se stejnosměrným napětím 12–24 V. Takto akumulovaná energie může sloužit k napájení komunikačních systémů, radiových a televizních přijímačů a dalších elektrických spotřebičů. Větší výkony malých VTE v rozsahu výkonu 2,5–10 kW mají obvykle výstupní napětí 48–230 V a jsou nabízeny k vytápění domů, ohřevu vody, případně pohonu elektrických motorů [6].

##### 3.1.2. Střední a velké větrné elektrárny

Elektrárny těchto výkonů jsou určeny k dodávání energie do rozvodné elektrické sítě. Ojedinelými případy však nejsou ani realizace elektráren těchto rozměrů pracujících v ostrovním režimu. Převážně z ekonomického hlediska nebývá zvykem výstavba pouze jednoho díla v dané lokalitě. Větší počet staveb snižuje náklady na jejich výstavbu.

Velké moderní třílisté VTE jsou konstruovány jako pomaluběžné s otáčkami rotoru do 20 ot.min<sup>-1</sup> [6].

##### 3.1.3. Větrné parky

Sdružují pohromadě 5 a více velkých VTE. Vnitrozemní větrné parky nedosahují takových velikostí jako mořské, ale i přesto jsou hojně budovány. Dnešním trendem



přímořských států je stavba tzv. Offshore Wind Parks, větrných parků instalovaných na moři i desítky kilometrů vzdálených od pevniny. Využívají zde pravidelnějších a silnějších větrů. Svou konstrukcí se jen málo liší od vnitrozemních elektráren. Vyrobená elektřina je vedena kabely, uloženými v moři, na pevninu. Jistým problémem je slaná voda, proto jsou nutná dostatečná protikorozní opatření. Výkon mořských větrných parků se pohybuje ve stovkách MW.

Při výstavbě větrného parku je limitujícím omezením minimální vzdálenost mezi jednotlivými větrnými elektrárnami. Tato vzdálenost je udávána v násobcích průměru rotoru ( $d$ ) a je omezena brázdovým efektem mezi jednotlivými soustrojími. V oblastech, kde není jeden dominantní směr větru, se doporučuje vzdálenost  $10d$ . Z průměru rotoru a minimálního rozchodu vyplývá maximální množství větrných elektráren na  $1 \text{ km}^2$ . Při šachovnicovém uspořádání například pro průměr rotoru 42 m a rozchod  $10d$  vychází počet větrných elektráren 5 až 6 na  $\text{km}^2$ . Menší rozchod je možný, ale na úkor účinnosti a snížení roční výroby energie. V oblastech, kde je dominantní jeden směr větru, je možné snížit vzdálenost až na  $5d$  a elektrárny by měly být situovány kolmo na převládající směr větru [7].



Obr. 5: Výstavba offshore větrné farmy [8].

## 3.2. Rozdělení podle konstrukce

### 3.2.1. Stožáry VTE

Výška stožáru se dnes standardně pohybuje od 40 do 110 m podle výkonu elektrárny. V Evropě je nejčastěji instalován ocelový tubusový stožár. Stožár je smontován ze segmentů, které mají délku přibližně 20 m (dělení na segmenty se používá kvůli snadnější přepravě). Segmenty jsou vyrobeny z plechových plátů, které jsou skruženy do prstenců a pak k sobě svařeny. Při stožárech vyšších než 100 m se již vyplatí uvažovat o výstavbě příhradového stožáru. Odpadají problémy s dopravou oproti rozměrným segmentům tubusového stožáru a je potřeba menší množství oceli. V poslední době se rozvíjí i stavba betonových stožárů. Pokud se v jedné lokalitě staví větší počet větrných elektráren, bývá tato varianta ekonomicky zajímavá pro daný region. Stožár se staví z prefabrikátů (betonových poloskruží), které se



vyrábějí v místní betonárce a na místě se pak kompletují do skruží, ze kterých se staví stožár. Pevnost takového stožáru pak zaručují předepjatá ocelová lana, která jsou vedena dutinami ve skružích od vrcholu stožáru až k jeho patě [9].

### 3.2.2. Uspořádání strojovny

Jako strojovna VTE je označováno vybavení turbíny umístěné v laminátové gondole na vrchu stožáru. Jednotlivé komponenty strojovny jsou individuální, záleží na použité technologii, kterou má každý výrobce jinou. Společnými částmi jednotlivých systémů mohou být natáčecí zařízení gondoly, olejové hospodářství, brzdy nebo způsoby natáčení listů rotoru.

Jednou z nejznámějších VTE je sestava propagující a používaná dánskou firmou Vestas. Obsahuje větrný rotor, planetovou převodovku a asynchronní generátor. Regulaci výkonu má na starosti již zmíněný asynchronní generátor, který je schopen pracovat v rozmezí otáček. Díky převodovce a generátoru umístěných za sebou má gondola tvar kvádra, což je typické pro tuto sestavu.

Dalším technickým řešením je použití multipólového synchronního generátoru. Odpadá tak těžká převodovka, což sníží hmotnost a hlukové emise díla. Jeden prstenec cívek generátoru je umístěn přímo na rotoru, druhý pak na statoru. Podle síly větru je spínán potřebný počet pólových dvojic, čímž se mění i výkon elektrárny. Takto vyrobený proud se musí ještě před připojením k rozvodné síti upravit pomocí výkonné elektroniky. Typickým tvarem tohoto vybavení strojovny je gondola vejčitého tvaru. Významným evropským představitelem a výrobcem VTE s multipólovými generátory může být německá firma ENERCON.

Třetí systém vybavení strojovny představuje česká firma WIKOV. Sestava složená z rotoru, převodovky, variátoru a synchronního generátoru by měla dosahovat nejvyšší účinnosti. Proměnlivé otáčky rotoru jsou zpracovány převodovkou s variátorem, generátor tak může pracovat již s otáčkami konstantními. Vyrobenou elektřinu je tak možné dodávat přímo do sítě [9].

### 3.2.3. Systém regulace

Pokud má VTE co nejefektivněji vyrábět elektřinu, neobejde se bez nějakého systému, který bude rotor přizpůsobovat povětrnostním podmínkám. Každá VTE je navržena pro určitou jmenovitou rychlost větru, což upřednostňuje její použití v konkrétní oblasti. Větší rychlost než je jmenovitá již představuje značný problém. Výkon roste s třetí mocninou rychlosti větru, bylo by tak teoreticky možné vyrobit více elektřiny. VTE by musela být dimenzována na vyšší rychlost větru, ta je však během roku zastoupena daleko menší četností, což by vedlo k neefektivnímu provozu elektrárny. Celoroční produkce elektřiny by tak byla mnohem menší, proto byly pro moderní zařízení navrženy tyto tři různé způsoby regulace:

Regulace Pitch využívá natáčení listů rotoru. Elektronický regulátor permanentně měří výkon zařízení. Pokud je příliš velký, natočí se listy rotoru lehce z větru. Když vítr zeslábně, natočí se listy opět do větru. Musí být tedy otočné kolem své podélné osy. Tento systém neslouží jen k zabránění škodám při příliš velkých rychlostech větru, ale i k maximalizaci výkonu při každé síle větru [10].

Regulace Stall využívá odtržení proudu větru. Listy rotoru jsou našroubované k hlavě s pevně nastaveným úhlem. Profily listů rotoru jsou z aerodynamického hlediska dimenzovány tak, že se za příliš silného větru vytvářejí na straně listů odvrácené od větru

turbulence. Při tomto odtržení proudu dochází ke snížení vztlakové síly pohánějící rotor. Výhoda regulace Stall spočívá v tom, že se lze vyhnout pohyblivému dílu u rotoru a komplikovanému systému regulace. Na druhé straně klade vysoké požadavky na aerodynamiku a nejsou ještě vyjasněny některé otázky, jako např. otázka vibrací vyvolávajících odtržení proudu, které se vyskytují na celé větrné elektrárně [10].

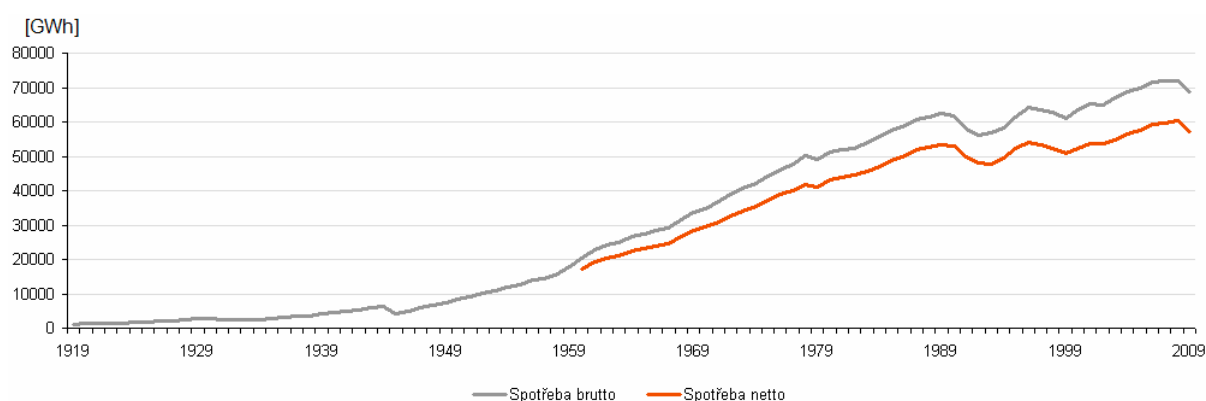
Posledním způsobem je aktivní regulace Stall. Listy rotoru jsou přestavitelné jako u regulace Pitch. Na rozdíl od ní se ale listy při dosažení jmenovitého výkonu otočí do protilehlého směru, takže se úhel nastavení zvýší a zesílí se odtržení proudu. Tím lze odrazit přebytečnou energii větru. Výhoda aktivní regulace Stall spočívá v tom, že výkon lze regulovat přesněji než u pasivní regulace Stall. Tím nedochází k přetížení generátoru při poryvech větru. Zařízení lze provozovat při vysokých rychlostech větru s jmenovitým výkonem, což u pasivní regulace Stall není možné, protože tam vyšší odtržení proudu způsobí silnější pokles výkonu. Aktivní regulace Stall se používá především u velkých větrných elektráren (1 MW a více) [10].

## 4. Spotřeba elektrické energie v závislosti na čase. Energetické špičky.

Pro jasnější představu, jaká byla a je spotřeba elektřiny, jsem použil několik grafů, které danou problematiku jednoznačně vysvětlují. Největší pozornost bych však v této kapitole věnoval denní spotřebě elektřiny, protože zde nastává největší problém, a to s regulací a akumulací energie v relativně krátkých časových intervalech. Zařazením OZE do energetického mixu se tento problém ještě zvětšuje. Je tedy nutné hledat a vyvíjet nové možnosti, které povedou k co nejlepším řešením energetických špiček vznikajících nerovnoměrným zatížením rozvodné sítě.

### 4.1. Historický růst spotřeby elektrické energie

Ohlédnutím do historie vidíme jistou skutečnost, že spotřeba elektřiny, až na nějaké výkyvy, stále rostla. Od roku 1919 zhruba do 50. let 20. století tento vzestup není tak markantní, jako v následujících letech, jak je patrné z grafu na obr. 6 spotřeby brutto. Větší pokles byl zaznamenán kolem roku 1994 a od té doby spotřeba prakticky neklesala.



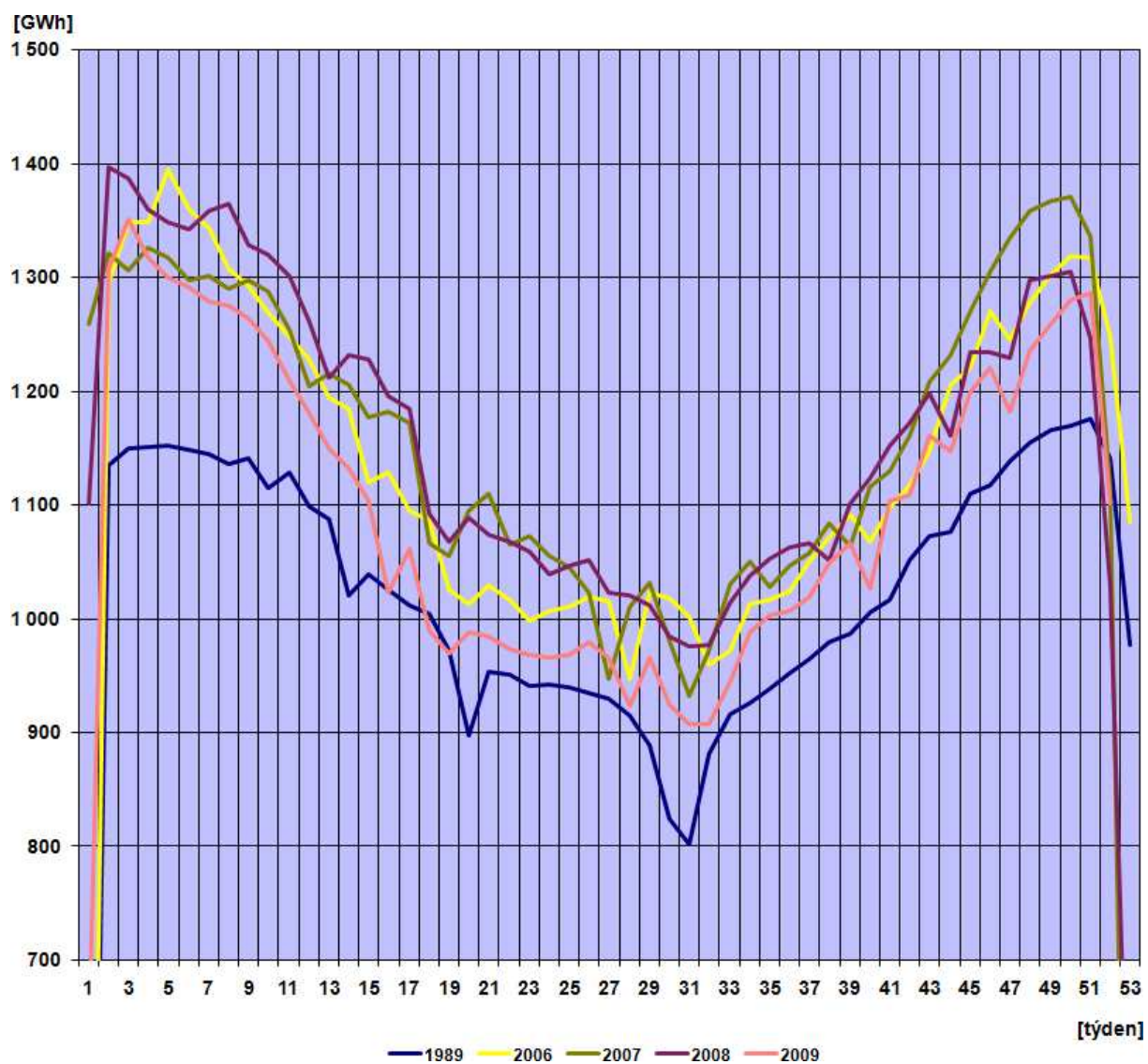
Obr. 6: Graf dlouhodobého vývoje spotřeby elektřiny v ČR [11].

### 4.2. Průběh spotřeby elektrické energie v jednotlivých týdnech roku

Jedním ze způsobů, jak znázornit průběh roční spotřeby elektřiny, je vykreslit ji v jednotlivých týdnech roku, jak je tomu v grafu na obr. 7. Týdny v konkrétních letech nemusí přesně odpovídat stejným měsícům. Pokud budeme vycházet ze skutečnosti, že v prvních třech týdnech je měsíc leden a koncem roku okolo 50. týdne prosinec, lze například odhadnout srpen okolo 30. týdne atd.

Z grafu je však zcela zřejmé, že největší odběr elektřiny bude v zimních měsících. Důvodem jsou klimatické podmínky a s nimi spojená potřeba vytápění objektů a také kratší doba slunečního svitu než v letním období, tedy nutnost umělého osvětlení ať už veřejných prostranství nebo domácností a podniků.

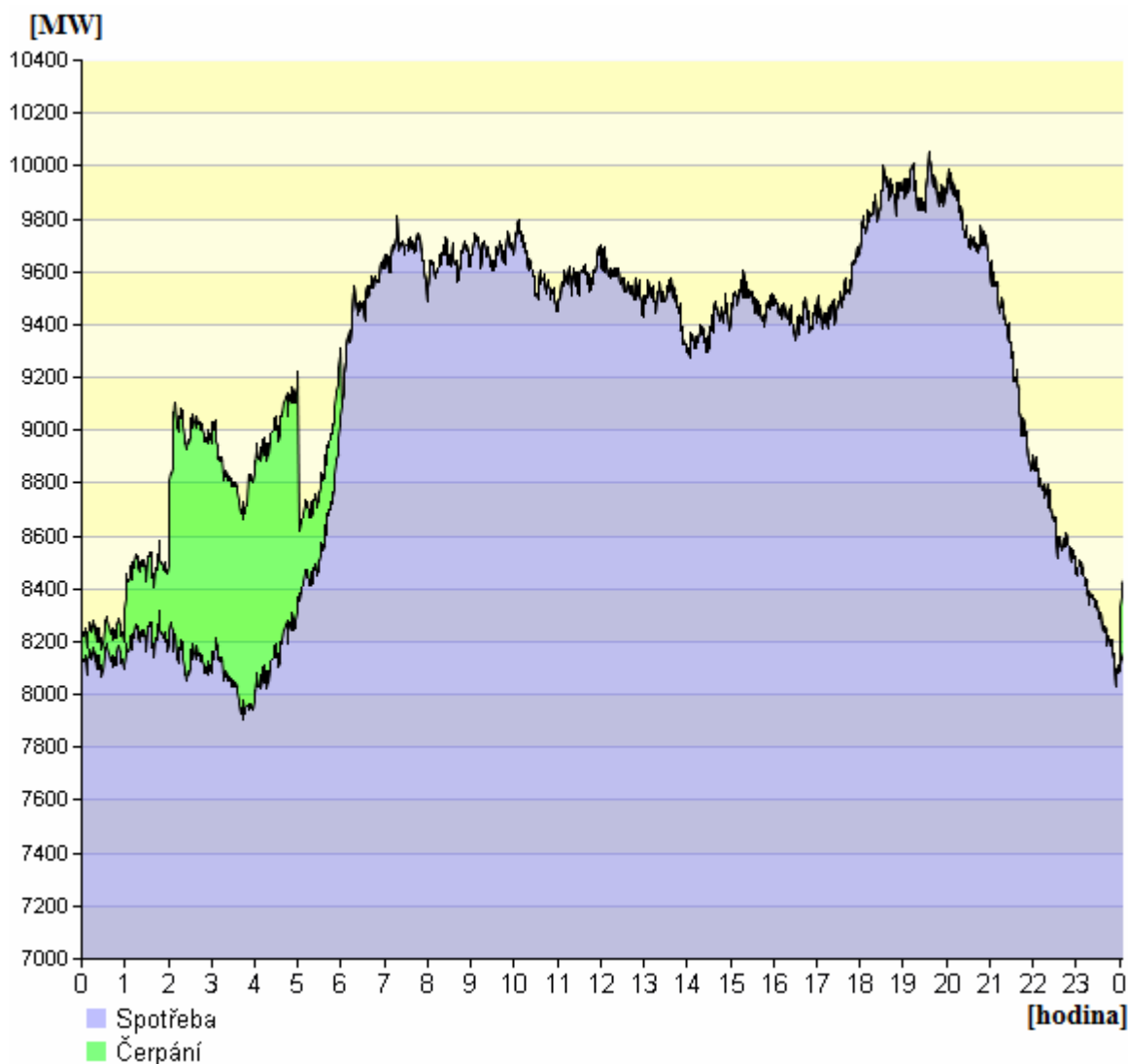
Dále můžeme z grafu vypožorovat určitou podobnost všech trajektorií (znázorněných roků), z čehož lze usuzovat, že doposud byla elektřina užívána ke stejným účelům řadu let, pouze o jiných hodnotách. Do budoucna je možné očekávat nějakou změnu způsobenou rozsáhlým zateplováním domů, stavbou nízko energetických domů, výměnou zdrojů světla a častějším používáním klimatizace v letních obdobích.



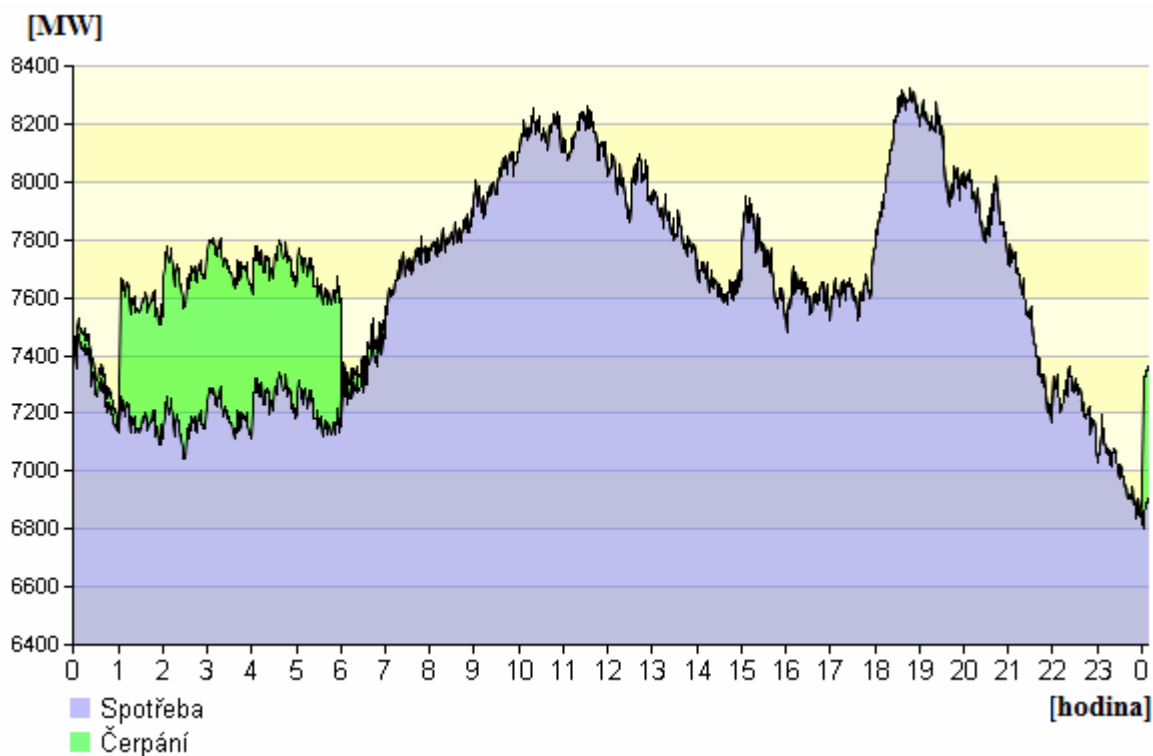
Obr. 7: Graf spotřeby elektřiny v jednotlivých týdnech roků v ČR [12].

### 4.3. Denní spotřeba elektrické energie, energetické špičky

Spotřeba elektřiny během dvaceti čtyř hodin je zrovna tak nerovnoměrná, jako během celého roku. Zde to ovšem nejsou následky klimatických podmínek, ale hlavně průmyslu, lidské činnosti v průběhu dne. I proto je patrné, že odběr elektřiny v den pracovní a den nepracovní se nebude pohybovat ve stejných číslech. Pro porovnání pracovního a nepracovního dne jsem zvolil středu graf na obr. 8 a sobotu graf na obr. 9.



Obr. 8: Graf průběhu zatížení sítě ve středu 2.3.2011[13].



Obr. 9: Graf průběhu zatížení sítě v sobotu 12.3.2011 [13].

Není jednoduché přesně určit, kde se elektřina spotřebovává. Do jisté míry je to však možné předpokládat z každodenní lidské činnosti. V grafu na obr. 8 i obr. 9 je zobrazena modrá a zelená plocha. Modrá část představuje spotřebu, čili odběr zákazníkem a zelená část patří akumulaci v PVE. Grafy je možné vysvětlovat takto:

Do 6ti hodin populace většinou spí, spotřeba je proto nízká a je čas pro akumulaci (PVE). Od 6. hodiny ranní se rozjíždí MHD, nabíhají ve většině podnicích stroje, vaří se káva ve velkém objemu. Tyto a další příčiny způsobí prudkou změnu v odběru proudu. Ten trvá do zhruba 19. hodiny, kdy nárůst odběru ještě stoupne, což se vysvětluje vařením a ohřevem vody a sledováním televize. Kolem 22. hodiny je zaznamenáván rapidní pokles spotřeby. Obyvatelstvo usíná.

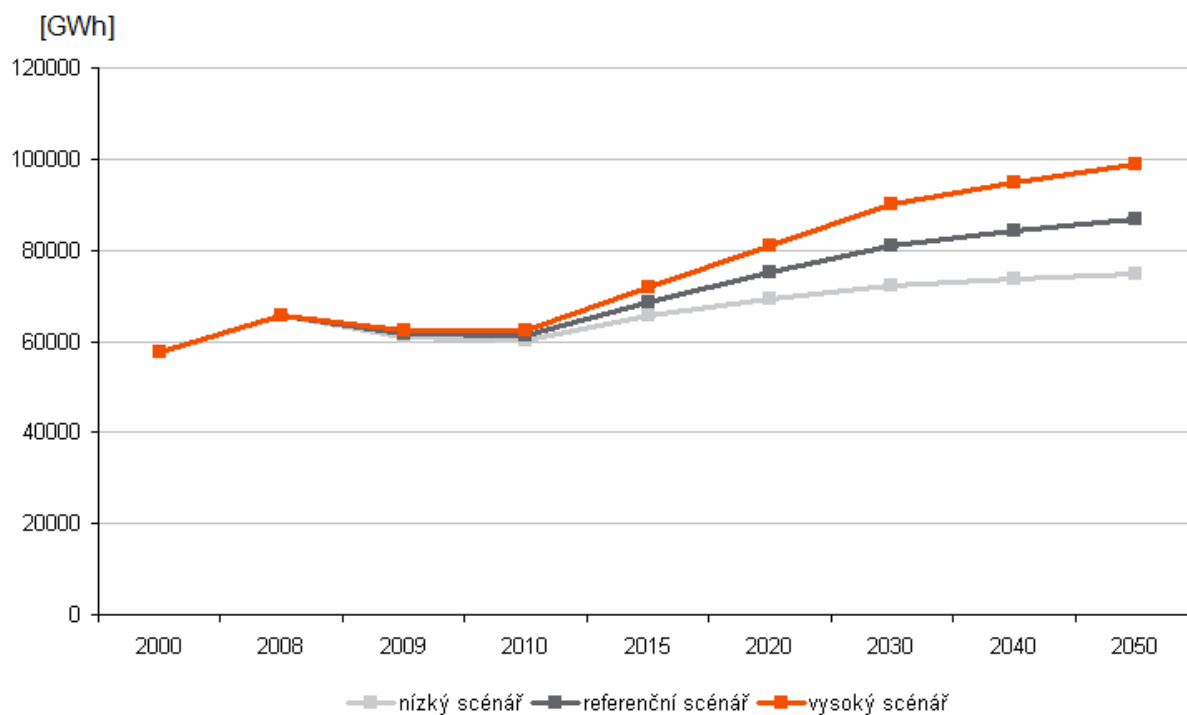
V určitých hodinách jsou tedy odběry elektřiny extrémní a vznikají tzv. energetické špičky (ráno a večer). Tyto špičky jsme schopni do určité míry regulovat, v ČR převážně pomocí PVE, které jsou schopny najet v řádech desítek sekund. Možnost stýkají i plynové turbíny, jejichž nájezdové doby se pohybují v jednotkách minut. Se současným velkým trendem rozvoje fotovoltaiky se vyskytují názory použít i tento zdroj jako špičkový. Doba nájezdu je prakticky v jednotkách sekund, ovšem jsme závislí na slunečním svitu.

Tomu odpovídá i rozdíl v ceně elektřiny základního zatížení a elektřiny špičkové. Podle údajů Energetické burzy Praha je cena špičkové elektřiny o 30 až 50 % vyšší než cena elektřiny v základním zatížení. Z dlouhodobého hlediska se rozdíl mezi cenou špičkové elektřiny a elektřiny základního zatížení zvyšuje [14].

#### 4.4. Predikce spotřeby elektřiny v ČR

Je zcela zřejmé, že spotřeba elektřiny bude nadále stoupat, není však úplně jasné jakým tempem. Podle společnosti ČEZ se tak může dít následovně jedním ze tří scénářů uvedených v grafu na obr. 10. Důvodů růstu je mnoho. Jedním z nich je zvyšování životního

standardu obyvatel. S tímto souvisí vyšší výroba a růst spotřebního průmyslu. Dalším důvodem je uvědomování si závislosti na ropě a zemním plynu dovážených z ciziny, kterou by bylo dobré snížit.



*Obr. 10: Graf predikce spotřeby elektřiny v ČR do roku 2050 [11].*

## 5. Možnosti akumulace větrné energie

Nabízí se celá řada možností, jak akumulovat energii větru. První co nás bude zajímat je, jakou formu energie chceme odebírat z akumulátoru. Nejčastěji požadujeme energii elektrickou, proto se tato kapitola zaměřuje převážně tímto směrem. Je však možné energii ukládat i ve formě pomletého obilí, vyčerpané vody určené například k zavlažování, jak tomu bylo hlavně v dřívějších dobách. Přímá akumulace elektrické energie představuje velký problém, který nejsme v současné době s alespoň jakousi přípustnou efektivitou řešit. Z tohoto důvodu se převádí na jiné formy energií, které uchovávat a ukládat dokážeme. Akumulační zařízení mohou řešit rozličné úlohy:

- vyrovnávat proměnlivý výkon aparátu v závislosti na měnící se rychlosti větru
- vyrovnávat výrobu a spotřebu energie, dodávat spotřebiteli energii tehdy, kdy ji potřebuje bez závislosti na klimatických podmínkách nebo zvýšeném odběru
- zvětšení celkové výroby větrného zařízení
- zvětšení efektivnosti využití energie větru
- možnost získávání velkého (špičkového) výkonu v krátkém časovém úseku [15]

Při řešení otázek spojených s akumulací energie vyráběné větrnými zařízeními je potřeba zvažovat různé vlastnosti akumulátorů: jejich měrnou hmotnost, měrné náklady, dobu uchování a možné ztráty při akumulaci, složitost energetických přeměn pro nabíjení akumulátoru, jeho konstrukční parametry, bezpečnost provozu atp.

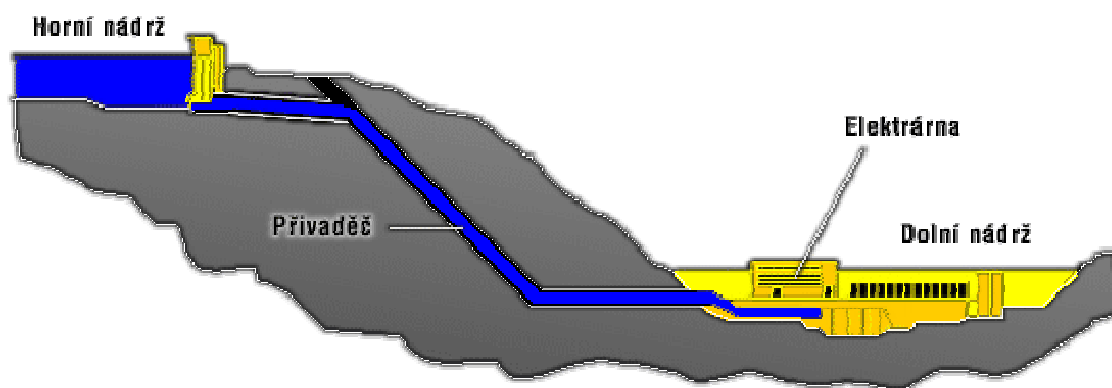
Obecně můžeme libovolnou soustavu akumulace charakterizovat těmito základními veličinami:

- maximální kapacita systému
- maximální rychlost nabíjení, dovolená úroveň napětí a rychlost vybíjení
- efektivnost systému a jeho účinnost [15]

### 5.1. Přečerpávací vodní elektrárna

Jedná se v podstatě o soustavu dvou výškově rozdílně položených vodních nádrží spojených tlakovým potrubím, na němž je v jeho dolní části umístěna turbína s elektrickým generátorem (obr. 11). Ta vyrábí elektřinu pro elektrizační soustavu v době energetické špičky, v době útlumu se voda z dolní nádrže přečerpává "levnou elektřinou" do nádrže horní, kde její potenciální energie čeká na své optimální využití v "pravou chvíli". Na každou akumulovanou kWh, kterou z přečerpávací vodní elektrárny odebíráme, je nutné k načerpání vody do horní nádrže vynaložit asi 1,4 kWh [16]. Životnost těchto elektráren je zhruba 100 let. Účinnost se pohybuje okolo 75 % a výše.

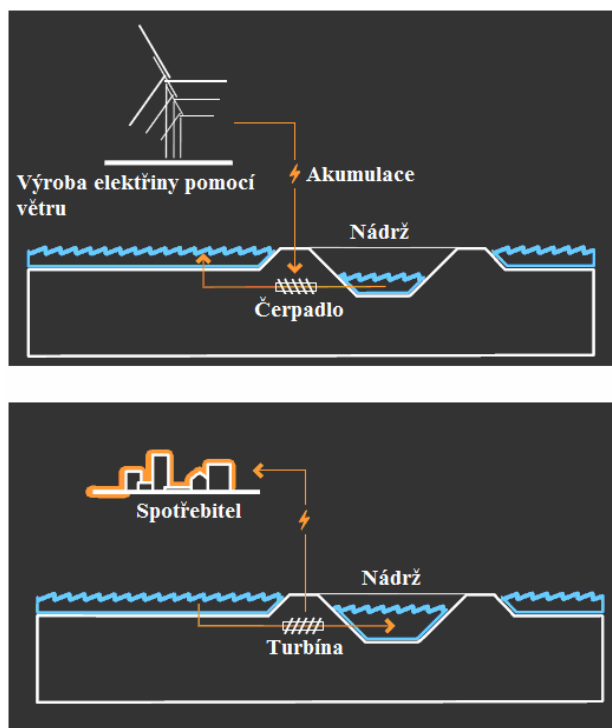




Obr. 11: Princip PVE [17].

PVE jsou nejpoužívanější a jedinou technologií akumulace elektrické energie pro velkou energetiku nejen v ČR, ale i ve světě. Realizace projektu čistě pro akumulaci energie z VTE pomocí klasických PVE není nejschůdnějším řešením.

Jiný pohled nám ovšem nabízí akumulace z větrných offshore farem nebo větších FVE poblíž moře. Tuto tzv. dánskou fintu, jak je systému přezdíváno, představili Dánové pod názvem Green Power Island v roce 2010. Poskytuje řešení s rostoucími přebytky zelené energie z OZE. Systém je založen na vybudování ostrovu přímo na moři, nejlépe poblíž pobřeží velkých měst. Ostrov bude koncipován jako velká nádrž hluboká podle možností (třeba 40 m), která se bude střídavě vypouštět a napouštět. Je nutné zmínit, že tento typ PVE pracuje na opačném chodu než jsme zvyklí. Princip je zcela zřejmý z obr. 12. VTE vyrobí elektřinu, kterou je z nádrže vybudované přímo v moři pomocí čerpadla vytlačena voda vně nádrže. V době spotřeby je čerpadlo přepnuto na turbínu a pomocí generátoru vyráběna elektřina. Ostrovy se mohou lišit tvarem i velikostí od cca 1,5 do 45 km<sup>2</sup> se zásobníkem energie od 800 do 35 000 MWh.

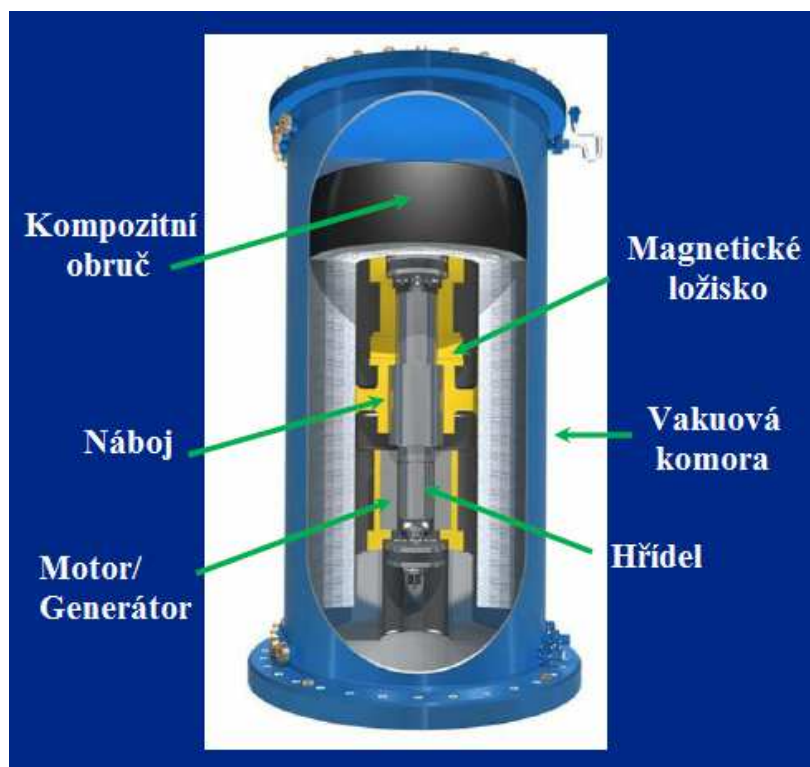


Obr. 12: Green Power Island [18].

## 5.2. Setrvačnickové akumulátory

Jedná se o mechanické akumulátory využívané již nesčetnou řadu let. Dříve byly tvořené těžkým diskem umístěným na rotujícím hřídeli. Jsou součástí každého spalovacího motoru, kde pomáhají svou energií překonávat mrtvé body a udržovat plynulý chod otáčení. Pro využití k akumulaci elektřiny je disk umístěn na hřídeli elektrického motoru. Motor uvede setrvačnický do pohybu o vysokých otáčkách a po přepnutí motoru na dynamo setrvačnický na úkor ztrát své energie vyrábí zpět elektřinu. Odezva je velice rychlá, sestava je vhodná pro krytí výkyvů v krátkých časových intervalech. Materiály na bázi uhlíkových kompozitů a pryskyřic nám nabízejí své jedinečné vlastnosti pro výrobu rotačních částí, kterými překonávají dříve používané litinové odlitky. Setrvačnický na bázi uhlíkových kompozitů a vyztužených plastů dosahuje účinnosti až 85 %.

Jedním z takových je i setrvačnický od americké firma Beacon Power na obr. 13. Uvnitř válcového obalu se otáčí a ve vakuové komoře levituje obruč z uhlíkového kompozitu, což umožňuje dosahovat vysokých otáček. Levitace je vytvořena kombinací permanentního magnetu a elektromagnetického ložiska. Motor odebírá elektřinu ze sítě a roztáčí kompozitní obruč na otáčky od 8 000 do 16 000 za minutu. V opačném případě motor funguje jako generátor a elektřinu do sítě dodává. Při maximálních otáčkách je v setrvačnicku uloženo až 25 kWh energie. SE25F nabízí řadu výhod, například vysoký počet cyklů nabití a vybití, až stovky tisíc za jejich 20 roků životnosti. Jsou ekologicky nezávadné, neprodukují oxid uhličitý ani nespalují žádné palivo, nekontaminují půdu, jednotlivé kusy lze výhodně spojit do velkých sestav, i 200 ks, čímž vzniká dostatečný výkon pro regulaci nestabilní elektřiny vyrobené z OZE [19].



Obr. 13: Setrvačnickový akumulátor SE25F [19].

Předností setrvačníků je rychlá odezva na požadavek elektřiny, proto nacházejí své uplatnění při náhlých výpadcích proudu, kdy zabezpečují chod zařízení před sepnutím záložních zdrojů (naftových nebo benzinových generátorů). Moderní setrvačníky jsou schopny dodávat energii i v řádech hodin. Spojením více kusů lze získat velký výkon pro krytí kolísavé výroby elektrické energie alternativními zdroji.

### 5.3. Supravodivé indukční akumulátory

Supravodivý jev, na jehož podstatě akumulátory fungují, objevil již roku 1911 nizozemský fyzik Kammerlingh Onnes, když ve rtuťové smyčce vymražené v kapalném heliu indukoval elektrický proud. Supravodivost dnes umíme vyvolat i v řadě kovů, slitin a dokonce ve speciální keramice už nejen při teplotách kapalného helia, ale i za ekonomicky dostupnějších teplot v kapalném dusíku a vodíku.

Ochlazováním kovů jako je zlato, stříbro nebo měď bylo zjištěno, že jejich elektrický odpor ani při dalším ochlazování nedosáhne dostatečně nízkých hodnot. Oproti tomu kovy jako je olovo, cín a jejich slitiny jsou supravodiči velmi dobrými. Rozeznáváme dva druhy supravodičů. První skupinu tvoří nízkoteplotní supravodiče známé pod zkratkou LTS s hodnotou kritické teploty 4,2 K, což je teplota varu kapalného helia. Druhou skupinu představují vysokoteplotní supravodiče HTS s kritickou teplotou nad 77 K, teplotou varu kapalného dusíku.

Proud ve vinutí cívek cirkuluje s minimální ztrátou 0,3 kWh za 24 hodin. Na pokles napětí sítě reagují během 0,2 mikrosekundy [20]. Supravodivé indukční akumulátory se díky rychlému sepnutí používají jako tzv. UPS zdroje. Uplatnění nacházejí u řady průmyslových podniků, počítačových centrál či serverů.

Větší supravodivé akumulátory SMES obstály při experimentech při milionech cyklů nabití/vybití s účinností lepší než 95 %. Podle zveřejněných projektů by smyčky v podobě prstenců uložené v podzemí mohly v budoucnu kapacitou až 4 000 MW nahradit i největší přečerpávací elektrárny s účinností blížící se 99 % [20].

### 5.4. Elektrochemické akumulátory

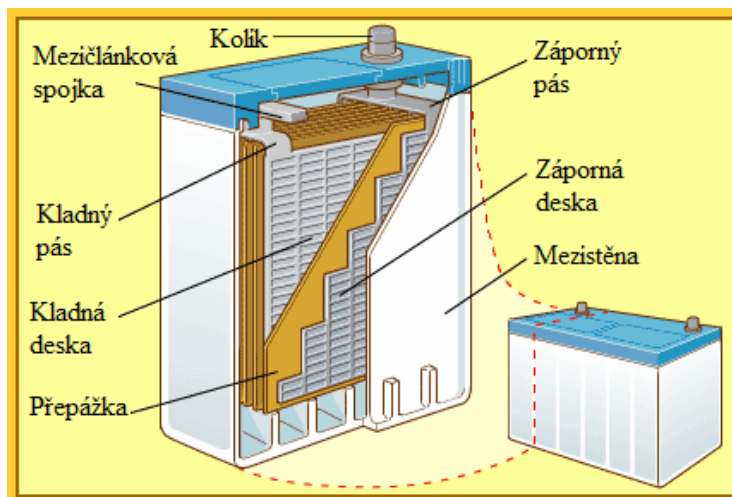
Jejich podstatou je přeměna elektřiny na energii chemickou, ve které ji dovedeme skladovat. Materiály a prvky vhodné k těmto chemickým dějům procházely časovým vývojem až do finálních podob dnešních chemických článků. Právě názvy jednotlivých článků v sobě nesou použité materiály (Pb, NiCd, LiIon, NiMH). Důležitými parametry pro porovnání jednotlivých typů článků jsou: kapacita, hmotnost, doba nabíjení, životnost (uváděná počtem nabíjecích cyklů), samovybití, napěťová hladina a možnost spojování, pracovní podmínky a v neposlední řadě pořizovací cena a možnost rozsáhlosti použití v energetice, případně OZE. Mezi elektrochemické akumulátory lze řadit i rozklad vody pomocí elektrolýzy a využití vodíku jako nosiče energie. Vodíkovému hospodářství, výrobě vodíku, možnosti použití, skladování a vlastnostem je věnována kapitola 6.

#### 5.4.1. Olověný akumulátor

Olověný akumulátor je nejznámější a nejpoužívanější akumulátor jak v automobilovém průmyslu, tak v odvětví VTE malých výkonů. Výhoda akumulátoru spočívá v nízké pořizovací ceně, dobré spolehlivosti a účinnosti až 92 %. Samovybíjecí schopnost

s pohybuje v rozmezí 3–20 % za měsíc. Nevýhodu však může být nízká kapacita v poměru k hmotnosti článku.

Olověný akumulátor vynalezl roku 1859 francouzský fyzik Gaston Planté. Sestává z párů olověných desek ponořených do nádoby s roztokem kyseliny sírové (obr. 14). Po nabití naměříme na svorkách páru elektrod napětí 2,1 V. Podle počtu olověnými spojkami propojených článků na uzavřeném povrchu dávají napětí 6, 12, 24 nebo 48 V. Nejrozšířenější automobilové akumulátory 12 V mají kapacitu 50 Ah a snesou až 500 nabíjecích cyklů. Ovšem k tomu, aby do jimi vyzbrojené akumulátorovny mohl průmysl akumulovat pouhých 1 000 kWh, by bylo nutné instalovat a zapojit 25 tun akumulátorů [21].



Obr. 14: Sestava olověného akumulátoru [22].

#### 5.4.2. Pokročilé chemické akumulátory

Od klasických olověných akumulátorů je odlišují některé vlastnosti: podstatně kratší doba nabíjení, vyšší mechanická odolnost, dlouhá životnost, nižší hmotnost, ale také vyšší pořizovací cena. Rozvoj a dosažení co nejlepších vlastností zasáhl i toto odvětví výroby, proto je možné, že některé nové kombinace materiálů budou opomenuty. Vybral bych alespoň některé používané typy akumulátorů, jsou to:

Nikl-železné (NiFe) – katodu článku tvoří nikl a anodu železo, obě destičky jsou ponořeny do elektrolytu na bázi hydroxidu draselného KOH. Jedná se o velmi robustní baterie odolné vůči přebíjení, velkému vybití i zkratu. I přes takové zacházení mají velkou životnost, i proto našly uplatnění jako trakční baterie. Článek poskytuje napětí 1,4 V, jeho účinnost se pohybuje v rozmezí 65–80 % a životnost 30 až 50 let. Samovybíjecí schopnost je 20–30 % za měsíc.

Nikl-kadmiové (NiCd) – kladnou elektrodu tvoří hydroxid niklu, zápornou kadmium. Obě elektrody odděluje separátor obsahující také elektrolyt KOH. Jmenovité napětí článku (při zátěži) je přibližně 1,2 V. Účinnost se pohybuje okolo 70–80 % s počtem nabíjecích cyklů 2 000 a samovybíjením od 10 % za měsíc. Velkou roli při samovybíjení hraje zvýšená teplota. Výhodou oproti ostatním typům akumulátorů je vysoká proudová zatížitelnost a odolnost vůči mrazu až do -15 °C. Navíc snesou pětikrát rychlejší nabíjení než typ NiMH a jsou až dvacetkrát razantnější než lithiová varianta. Trpí však tzv. paměťovým efektem, snižujícím výrazně jejich kapacitu. Takový akumulátor pak vydrží pracovat třeba jen několik minut. Je-li

NiCd akumulátor ochromen paměťovým efektem, lze jej opakovaným vybíjením a nabíjením reaktivovat.

Nikl-metalhydridové (NiMH) – mají podobnou stavbu jako NiCd, používají ale mnohem ekologičtější materiály. Rozdíl oproti řešení NiCd představuje vodík vázající slitina, která nahradila jedovaté kadmium. Výhodou je i absence paměťového efektu. Stejně jako u NiCd článku je jmenovité napětí 1,2 V, samovybíjení kolem 30 % za měsíc. Účinnost tohoto článku se uvádí 66 % a počet nabíjecích cyklů 500–1 000. NiMH článek uskladní při těžce hmotnosti téměř dvojnásobek energie oproti NiCd.

Lithium-iontové (LiIon) – katodu v těchto bateriích tvoří metal-lithiový oxid ( $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMO}_2$ , atd.) a anoda je vyrobena z grafitického uhlíku s vrstvenou strukturou. Elektrolyt tvoří lithiové soli (např.  $\text{LiPF}_6$ ) rozpuštěné v organických uhličitanech. Jmenovité napětí článku je 3,6 V. Hlavní výhody Li-Ion baterií oproti ostatním moderním bateriím jsou vysoká hustota energie, malá samovybíjecí schopnost, účinnost 80 %, dlouhá životnost 500–2 000 nabíjecích cyklů a netrpí paměťovým efektem. Své uplatnění nacházejí především u malých přenosných přístrojů. V případě velkých baterií je nutné vyřešit několik problémů. Největší překážkou je vysoká cena kvůli zvláštnímu obalu a vnitřním ochranným obvodům proti přetížení.

Zinko-vzdušné – anodu v této baterii tvoří zinek, který při oxidaci uvolňuje elektrony. Katody nebo vzduchové elektrody jsou často vyrobeny z porézní uhlíkové struktury nebo kovové mřížky zakryté vhodnými katalyzátory. Elektrolyt často představuje dobrý vodič  $\text{OH}^-$  iontů, například KOH. Elektrolyt může být kapalný nebo pevná polymerová membrána nasycená KOH. Baterie kov-vzduch jsou nejkompaktnější a potenciálně nejlevnější dostupné baterie. Hlavní nevýhodou je však jejich velmi obtížné a neefektivní elektrické dobíjení. Ačkoliv mnoho výrobců nabízí výměnné jednotky, ve kterých lze spotřebovaný kov mechanicky nahradit a samostatně zpracovat, jen málo vývojářů nabízí baterii se schopností elektrického dobíjení. Dobíjecí baterie zinek-vzduch procházejí vývojem, mají životnost jen několik set cyklů a účinnost okolo 50 %.

Sodíko-sírové (NaS) – skládá se z kapalné síry na kladné elektrodě a kapalného sodíku na záporné elektrodě. Tyto aktivní materiály jsou rozděleny pevným elektrolytem z keramického oxidu hlinitého. Tok elektronů ve vnějším obvodu baterie vytváří asi 2 V. Aby byl tento proces možný, je baterie uchovávána při teplotě asi 300 °C. Měrným výkonem překonávají trojnásobně výkon stejně těžkých akumulátorů olověných. Představují velký výkon, kapacitu a účinnost dosahující 89–92 %. Kvůli vysokým teplotám nutným k roztavení prvků a vysoce korozní povaze sodíku jsou tyto akumulátory vhodné především pro velké stanice.

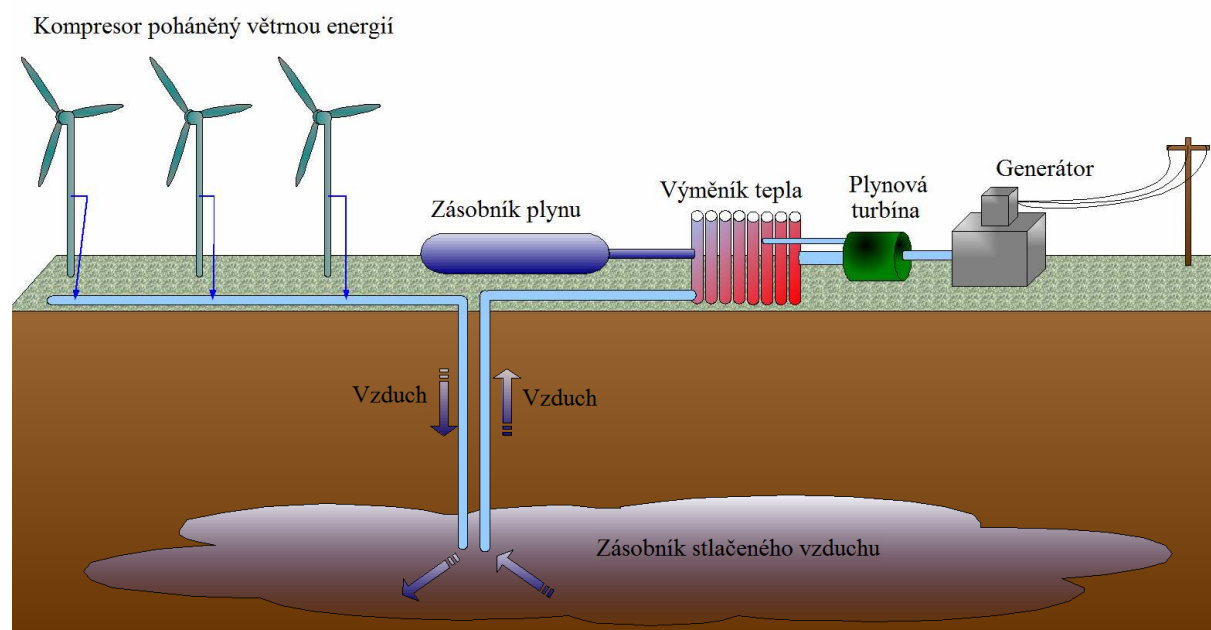
## 5.5. Superkondenzátory

Kondenzátor poskytuje prakticky jediný způsob, jak skladovat elektrinu přímo ve formě elektrického náboje. Ve srovnání s elektrochemickou baterií je hustota energie malá, avšak díky nepatrnému vnitřnímu odporu lze tuto energii velmi rychle dostat ven. Superkondenzátory se začaly komerčně uplatňovat v posledních 10ti letech, ačkoliv první vzorek je již z roku 1957. Používají se i jiné názvy – ultrakondenzátory, elektrochemické dvouvrstvé kondenzátory aj. Vlastnostmi je to něco mezi baterií a kondenzátorem. U superkondenzátorů je jejich „supervelká“ kapacita dána tím, že elektrody jsou ze speciálního materiálu, jako je mikroporézní aktivovaný uhlík, který se vyznačuje extrémním povrchem a tím, že vzdálenost mezi nabitými vrstvami je jen několik nanometrů. Dají se tak

realizovat superkondenzátory s kapacitou až několik tisíc faradů, tedy o několik řádů více, než je možné u foliových kondenzátorů. Používané organické elektrolyty snesou napětí kolem 2,5 V [23].

## 5.6. Tlakovzdušná akumulace

Technologie známá pod zkratkou CAES spočívá v kompresorovém stlačování vzduchu do zásobníku, kterým může být například uzavřená jeskyně nebo kaverna (dutiny pod zemským povrchem, vytěžené ložiska soli, uhlí, plynu...). Vzduch je v kaverně uložen a použit pro pohon plynových turbín v době potřeby výroby elektřiny, tedy v elektrické špičce. Kompresory pohání levná elektřina vyráběná mimo špičku nebo též elektřina vyrobená pomocí OZE, například VTE. Plynová turbína v samostatném zapojení se skládá z kompresorových a turbínových lopatek uložených na jednom společném hřídeli. Pro stlačení vzduchu přiváděného do turbíny je potřeba dvou třetin celkového výkonu sestavy. V případě použití akumulace CAES tak ušetříme energii pro stlačení vzduchu, což se projeví ve snížení spotřeby plynu. Výkon a doba produkce energie závisí na velikosti kaverny. Účinnost akumulace dosahuje hodnot 50–70 % a tlak v zásobníku se pohybuje okolo 6 MPa.



Obr. 15: Schematické zapojení sestavy CAES [24].

## 5.7. Tepelné akumulátory

Při tepelné akumulaci lze využívat buď běžný ohřev vhodné látky, kdy množství akumulovaného tepla je přímo úměrné změně teploty, měrné tepelné kapacitě látky a její hmotnosti, nebo lze k akumulaci tepla využívat přeměnu skupenství látky buď při jejím tavení nebo při přeměně kapalného skupenství na plyné [15]. Stejně jako teplo lze akumulovat i chlad, slouží-li větrný motor s příslušenstvím pro jeho výrobu.

Pro akumulaci ohříváním do teploty 95 °C je mimořádně vhodná voda svou vysokou měrnou tepelnou kapacitou a snadnou dostupností a současně vhodným uplatněním jako

nosná látka. Tepelná akumulace, ve zapojení s VTE, se používá většinou pro účely vytápění objektů nebo pro jejich zásobování TUV [15].

## 6. Vodík a vodíková akumulace

Vodík je univerzálním nosičem s velmi vysokým obsahem energie,  $243 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Lze ho vyrobit z dostupných primárních zdrojů včetně uhlí, zemního plynu a biomasy nebo elektrolýzou vody s použitím elektrické energie z jaderných elektráren či obnovitelných zdrojů energie (vodní, větrné, solární). Vodík by se tak mohl uplatnit i při vyrovnávání výkyvů mezi špičkovým a mimošpičkovým odběrem elektrické energie podobně jako PVE nebo jiné akumulátory energie.

### 6.1. Vlastnosti a výroba vodíku

Vodík je nejlehčí a nejjednodušší plynný chemický prvek, tvořící převážnou část hmoty ve vesmíru. V tabulce chemických prvků zaujímá první místo. Dále je to plyn bezbarvý, bez chuti a zápachu, hořlavý (hoří namodralým plamenem), stabilní za normální teploty, velmi málo rozpustný ve vodě. Při zahřátí reaguje, s kyslíkem a halogeny se slučuje velmi bouřlivě. Vytváří chemické sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky kromě vzácných plynů. Schopnost vodíku rozpouštět se v některých kovech je dána jeho velmi malými molekulami, které jsou schopny procházet mřížkou těchto materiálů. V přírodě se vyskytuje elementární vodík jen vzácně. Je jednou ze složek zemního plynu a nachází se i v ložiscích uhlí. Dále se pak vodík vyskytuje hlavně ve sloučeninách. Nejznámější nám bude asi voda, kterou tvoří společně s kyslíkem.

Samotná výroba vodíku je velice náročný energetický proces. Existuje několik technologií, jak jej vyrábět. Nejlevnější a nejrozšířenější je parním reformingem zemního plynu, tento postup nás však tematicky zajímat nebude. Jinou možností je výroba vodíku z obnovitelných zdrojů. S jejich využitím se vodík získává pomocí elektrolýzy vody, vysokoteplotního rozkladu vody, zplyňováním či pyrolýzou biomasy nebo výrobou s využitím speciálních bakterií [25].

Své využití vodík nachází v mnoha průmyslových odvětvích, od chemického, metalurgického, přes dopravní, až k energetickému. Co nás především bude zajímat, je využití vodíku jako zdroje nebo úložiště pro výrobu elektrické energie.

Jak již bylo dříve zmíněno, od vodíku se očekává slibná budoucnost nejen na poli energetickém, ale i v dopravě. Jedná se totiž o ekologické palivo, při jehož spalování se neprodukuje oxid uhličitý ani jiné nebezpečné plyny, ale pouze čistá voda. Jako palivo se již používá pro pohon raket, prototypů automobilů a autobusů. Energetické využití představují v posledních letech hojně diskutované a zdokonalované palivové články.

### 6.2. Elektrolýza vody

Elektrolýza je jev, při kterém se rozkládá voda na kyslík a vodík pomocí stejnosměrného proudu většinou připojeného na platinové elektrody. Elektrody jsou ponořeny ve vodě s příměsí nějaké soli, která pomáhá vést proud mezi nimi. Vodík se váže na zápornou elektrodu a na kladnou zase kyslík. Aby se tyto plyny neslučovaly, jsou odděleny membránou. Podle typu elektrolýzérů jsou membrány tvořeny různými propustnými materiály. K elektrolýzérům bude více řečeno v kapitole, kde budou popsány jednotlivé komponenty sestav elektrolytické výroby vodíku za pomoci VTE.



Produktem elektrolýzy je vedle kyslíku již zmíněný vodíkový plyn o vysoké čistotě 99,999 %. Hodnoty čistoty plynu se mohou lišit jednotlivými způsoby elektrolýzy, neklesají však pod 99,9 %. Účinnost samotné elektrolýzy se pohybuje v rozmezí 80–92 %. K této hodnotě je však nutné ještě přičíst účinnost energetického zdroje, ze kterého odebíráme proud pro napájení elektrolýzérů. Celková účinnost elektrolýzy se tedy pohybuje přibližně v rozmezí 25–35 %.

### 6.3. Skladování vodíku

Vodík má ze všech paliv nejmenší hustotu a nejnižší bod varu, což značně komplikuje jeho skladování. Technologie pro skladování vodíku můžeme dle stupně výzkumu a vývoje v zásadě rozdělit na konvenční a alternativní. Ke konvenčním technologiím patří především tlakové nádoby pro plynný vodík a kryogenní nádoby pro zkapalněný vodík. Zástupcem alternativních technologií je např. skladování vodíku v metalhydridech, komplexních hydridech, v nanostrukturách uhlíku a jako součást chemických látek [26].

Tlakové nádoby jsou v dnešní době nejběžnější formou skladování stlačeného plynného vodíku. Jsou vyrobeny z nízkouhlíkové oceli bez použití svarů. Objem nádob se pohybuje v řádech jednotek litrů až desítek litrů pro standardní aplikace. Důležitým parametrem je tlak v nádobě (35–100 MPa). S rostoucí hodnotou tlaku se zvyšuje objem uloženého média, ale i náklady a bezpečnost s tímto spojené. Další možností pro ukládání plynného vodíku je využití vytěžených solných dolů nebo ložisek zemního plynu. Tlak v těchto zásobnících se pohybuje kolem 11 MPa.

Skladování vodíku ve formě kapaliny je energeticky náročnější, než je tomu u plynného vodíku. Kapalný vodík nelze skladovat při normální okolní teplotě jako jiné nosiče energie a paliva (nafta, plyn...). S teplotou se musíme dostat pod bod varu, která je u vodíku při normálním tlaku  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Energie vynaložená ke stlačení a ochlazení se jeví jako ztráty, které dosahují až 30 % energie uložené v kapalném vodíku. Jako zásobníky se užívají vysokotlaké tepelně izolované nádrže s pláštěm o několika vrstvách, jejichž meziprostor může být vyplněn vakuem.

Systémy skladování v metalhydridech jsou založeny na principu snadné absorpce plynu určitými materiály za podmínek vysokého tlaku a mírných teplot. Tyto látky pak uvolňují plynný vodík tehdy, když jsou zahřívány při nízkých tlacích a relativně vysokých teplotách. Výhoda metalhydridových skladovacích systémů se soustřeďuje na fakt, že vodík se stává součástí chemické struktury těchto kovů, a proto dále není požadovaný vysoký tlak nebo kryogenní teplota pro vlastní provoz [27].

Doposud dosažené výsledky týkající se skladování vodíku nejsou dostačující pro rozsáhlé komerční využívání. I proto se vývoj nových technologií ubírá dopředu. Jedny z možností skladování, které se zdají být na zdárné cestě, jsou využití vysoké pórovitosti nanostruktur grafitu nebo chemických sloučenin obsahujících vodík.

### 6.4. Přeprava a distribuce vodíku

V porovnání s přepravou jiných nosičů energie, jako je uhlí, ropa, zemní plyn nebo uran, je transport vodíku spojen s řadou problémů, které zvyšují náklady a požadavky na jeho dopravu a bezpečnost. Vodík je možné přepravovat v kapalně i plynné formě jak potrubím, tak v kontejnerech.

Na vodíkové potrubí je nutné použít oceli odolné proti křehnutí, zejména pro velmi čistý vodík (> 99,5%). Pro stlačování a dopravu ve vedení jsou vhodné pístové kompresory používané u zemního plynu. Důležité je však dobré utěsnění celého systému a volba vhodných materiálů. Z důvodu podstatně většího objemu na jednotku energie je nutné dopravní potrubí o větších průměrech než pro zemní plyn. Výhodou jsou nižší tlakové ztráty, a tudíž možnost menšího počtu přetlakových stanic. Z různých studií vyplývá, že náklady na přenos vodíku jsou 1,5–1,8 krát větší než u zemního plynu. Nicméně přeprava vodíku na vzdálenosti větší než 1 000 km je hospodárnější než přenos elektřiny.

Pro regionální přepravu a malé vzdálenosti je možné využít zásobníků zmíněných o několik odstavců výše. Silniční transport vodíku je však spojen s vysokou rizikovostí.

## **6.5. Stanice pro výrobu vodíku**

Každá sestava si klade za cíl produkovat vodík. V našem případě zde bude jako zdroj sloužit VTE. Použití fotovoltaických panelů jako zdroje elektřiny je taktéž možnou variantou ekologické cesty, avšak tato práce není zaměřena tímto směrem.

Je vhodné poznamenat, že jednotlivá řešení jsou povětšinou případy kusovými zakázkami. Hlavními důvody jsou rozdílné klimatické podmínky, dostupnost a poptávka po vodíku nebo elektřině v dané lokalitě, s tím spojené náklady na výrobu takto vyrobené energie a velikost větrné farmy.

Přestože se jedná o vyspělou technologii, elektrolýza vody ve spojení s energií větru má určitá specifika. Jedním z nich je přerušovaný provoz, tedy závislost na proměnlivém výkonu VTE, respektive na síle větru. Proměnlivý výkon může způsobit nepřípustné koncentrace vodíku a kyslíku uvnitř elektrolyzérů, vytvořit nebezpečné prostředí a vést až k jeho zničení. Proto je nutné nastavit bezpečnostní alarm na nižší koncentrace. Elektrolyzér nejlépe pracuje při nominální provozní teplotě, která je dosažena po určitém čase, proměnlivý vstupní výkon tuto teplotu snižuje a tím klesá i účinnost systému. Stejně tak vyšší napětí představuje nižší účinnost, i když výroba vodíku je vyšší.

## **6.6. Přehled sestav zařízení**

Nejdůležitější vstupní hodnotou pro správnou volbu celého systému je již zmíněný výkon VTE, ale také potenciální odběratel vodíku nebo elektřiny v konkrétní lokalitě. Celá sestava je tvořena řadou komponentů, které je možné výhodně zapojovat a kombinovat podle potřeb zákazníka. Takto vyrobený vodík se používá v různých aplikacích, jako je již zmíněná akumulace elektrické energie a s ní spojená regulace špičkového výkonu, vodík jako palivo lze využít v dopravních prostředcích.

### **6.6.1. Výroba vodíku pouze elektřinou z VTE**

Nejjednodušší možná aplikace, která se skládá pouze z větrné turbíny, měniče AD/DC nebo DC/DC s řídicím systémem a elektrolyzérů. Produktem elektrárny je tedy pouze vodík. Výhodou zapojení je, že odpadají poplatky distribuční síti spojené s připojováním VTE do sítě, které mohou být v některých státech vyžadovány. Pro efektivnější provoz by bylo výhodné použití větrného motoru s proměnlivým výkonem přizpůsobeného elektrolyzérů.

### 6.6.2. Výroba vodíku elektřinou z VTE s pomocí sítě

Tento model počítá s použitím části elektrické energie z rozvodné sítě. Odstraní se tím problém s proměnlivým výkonem vstupujícím do elektrolyzátoru, neboť je pouze část elektřiny vyrobena větrným motorem a doplňující část pro předepsanou velikost elektrolyzátoru vyrovnávána elektřinou odebranou ze sítě. Takovéto řešení pracuje s vyšším kapacitním faktorem elektrolyzátoru, což se může pozitivně ekonomicky projevit snížením nákladů na vodík.

### 6.6.3. Výroba vodíku s kombinovanou dodávkou elektřiny do rozvodné sítě

Tato varianta zapojení nabízí v době špičkového odběru elektřinu do rozvodné sítě. Mimo špičku pak za nízkou cenu elektřiny vyrábí vodík. Kapacitní faktor elektrolyzátoru je nízký, protože zde není řešen problém s proměnlivým výkonem v době výroby vodíku. Zapojení tak funguje jako špičkový zdroj, ovšem jen za předpokladu, že v době takovýchto časových intervalů během dne jsou vhodné větrné podmínky.

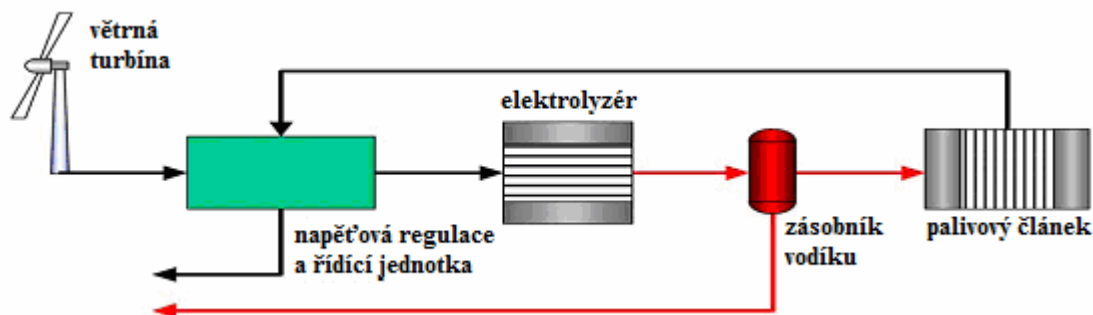
### 6.6.4. Výroba vodíku pro akumulaci elektrické energie

Jedná se o již sofistikovanější uspořádání jednotlivých komponentů s cílem dodávat do sítě konstantní nebo jiné požadované napětí nezávisle na čase. V sestavě přibyl palivový článek a zásobník vodíku, který zde plní onu funkci akumulátoru energie. Elektrolyzátor zde použitý pracuje při tlacích až 200 bar, kdežto u předchozích schémata pracoval za tlaku atmosférického. Elektrická energie vyrobená tímto způsobem je v dnešní době příliš drahá a vyplatí se pouze v omezených případech. Hodnotu elektřiny na vysoké úrovni udržují vysoké náklady na použitou technologii.

### 6.6.5. Integrovaná výroba vodíku a elektřiny

Podobného systému lze použít jako autonomního zdroje napájení. V tomto případě je skladování vodíku nezbytné a regenerační palivové články jsou schopny konkurovat jiným technologiím akumulace energie. Produktem je tedy elektřina i vodík.

Jednou z možností je vyrobený vodík používat jako palivo pro palivový článek a následně vyrábět elektrickou energii, nebo jako energetický zdroj pro dopravu a průmysl.



Obr. 16: Schematický diagram integrované výroby vodíku a elektřiny [29].

## 6.7. Hlavní komponenty sestavy

### 6.7.1. Větrná turbína

Větrná turbína je stěžejním komponentem, na kterém závisí ostatní jednotky systému. Slouží jako hlavní zdroj elektrické energie pro samotný proces výroby vodíku, pokud není elektřina dodávána do rozvodné sítě podle jiného scénáře. Výkon VTE je dán povětrnostními podmínkami. Před započítáním stavby takového rozsahu o velkých investičních nákladech je nezbytné měření v dané lokalitě a výpočet průměrného výkonu elektrárny. Statistickým vyhodnocením rychlosti větru se budeme zabývat v kapitole 7 této práce.

Větrník, jak je často těmto turbínám přezdíváno, byl blíže popsán již v kapitole 3 věnované vrtulovému VTE.

### 6.7.2. Napěťová regulace a řídicí jednotka

Rozklad vody se dá provádět pouze stejnosměrným proudem, proto je nutné vygenerovanou elektřinu nejprve převést na vhodné parametry, pro které je elektrolyzátor vyrobený. Pokud je elektřina dodávána do rozvodné sítě a nemá charakter střídavého proudu, frekvenci a síťového napětí, je nutné těchto hodnot dosáhnout pomocí transformátorů, měničů napětí AC/DC nebo DC/DC a kmitočtových měničů či jiných zařízení. Každý stát má různé hodnoty síťového vedení. V ČR je síťová frekvence 50 Hz s tolerancí  $\pm 1$  %, jmenovité napětí fázové 230 V a sdružené 400 V, obě s tolerancí  $\pm 10$  %.

Tento blok dále může obsahovat klimatizaci, vypínače a přepínače napájení, měřiče energie atd. Regulace a měniče napětí snižují celkovou účinnost systému ovšem jen nepatrně, ztráty na měničích jsou maximálně 7 %.

### 6.7.3. Elektrolyzátor

Elektrolyzátor je zařízení generující vodík, z upravené vody, za pomoci elektrického proudu. Na výrobu jednoho kilogramu plynného vodíku o atmosférickém tlaku a teplotě 25 °C se spotřebuje zhruba 39 kWh elektřiny. Nejčteněji používané technologie pro produkci vodíku jsou:

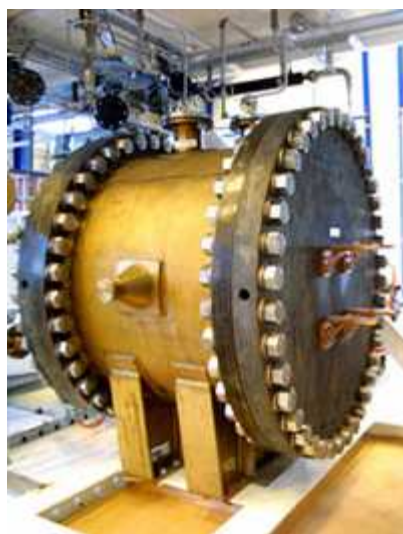
#### Elektrolyzéry PEM (Polymer Electrolyte Membrane)

Jako elektrolytická membrána oddělující anodu a katodu slouží elektricky nevodivá polymerní tuhá látka. Její nejvýznamnější vlastnost je schopnost propouštět pouze protony. Další funkcí je oddělovat oba vznikající plyny. Komerčně dostupné PEM elektrolyzéry využívají bipolární konstrukci a mohou produkovat vodík o tlacích 14–140 bar bez použití kompresoru. S rostoucí proudovou hustotou nad 1 500 mA·cm<sup>-2</sup> klesá i účinnost systému, ale výroba vodíku se zvyšuje.

#### Alkalické elektrolyzéry

Tato technologie využívá ke svému procesu roztok vody a hydroxidu draselného, sodného nebo chloridu sodného. Tekutý elektrolyt umožňuje vedení iontů mezi elektrodami. Elektrolyt není v reakci spotřebováván, ale musí být zachován a periodicky nahrazován. Alkalické elektrolyzéry mohou pracovat při různých tlacích, což ovlivňuje i jejich další parametry včetně výkonu. Atmosférické elektrolyzéry dovedou vyprodukovat 50–485 Nm<sup>3</sup>·h

vodíku. Jsou určeny pro různé průmyslové aplikace. Jiným zástupcem je PME (Pressure Module Elektrolyser) na obr. 17. Tento tlakový elektrolyzér pracuje na tlaku 3 MPa a byl speciálně vyvinut pro decentralizovanou výrobu vodíku.



*Obr. 17: PME elektrolyzér [30].*

Proudová hustota alkalických zařízení se pohybuje v rozmezí  $200\text{--}600\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  oproti PEM, kde proudová hustota dosahuje více než  $1\,500\text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Vlastní spotřeba elektrolyzérů se pohybuje od 4 do  $6,4\text{ kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$  vodíku, což odpovídá účinnosti okolo 80 %. Moderní pokročilé elektrolyzéry hlásí účinnost i vyšší než 90 %.

Výhodou elektrolyzérů je kompatibilita nejen s větrem, ale i s ostatními OZE vyrábějícími elektrickou energii. Je možné tak zapojovat hybridní sestavy šité na míru pro danou lokalitu a potřebnou produkci ať už vodíku nebo elektrické energie. Důležitým krokem pro efektivní využití zapojení elektrolyzérů s větrnou turbínou je jejich správné dimenzování. Obě zařízení pracují s určitým kapacitním faktorem, což je koeficient využití instalovaného výkonu. Elektrolyzér může využívat veškerý dodaný výkon z větrného motoru, fungoval by tak na stejném kapacitním faktoru. Úspornějším řešením může někdy být dimenzování elektrolyzérů na výkon nižší.

#### **6.7.4. Zásobník**

Uskladňování vodíku bylo popsáno v kapitole 6.3. Zde bych chtěl pouze poznamenat, že je možné použití obou forem skladování. Jako nízkotlaký zásobník plynného vodíku je možné použít i dutý tubus samotné větrné elektrárny.

Ke stlačení plynu se používá kompresor, který stlačuje plynný vodík do zásobníku na tlak až 350 bar.

Dalším možným zásobníkem mohou být nikl-hydridové baterie. Jejich životnost je zhruba stejná jako životnost větrného díla a vydrží namáhání enormním počtem cyklů.

#### **6.7.5. Palivový článek**

Palivový článek je jedním z moderních elektrochemických zdrojů proudu, který vzniká přímou přeměnou chemické energie na elektrickou. Jako palivo slouží vodík nebo

metanol a kyslík odebíraný ze vzduchu. Jsou založené na reverzní elektrolýze, vyrábějí tedy stejnosměrný proud. Podle použitého elektrolytu rozeznáváme PČ:

- Alkalické (AFC)
- S polymerní elektrolytickou membránou (PEMFC)
- S kyselinou fosforečnou (PAFC)
- S tavenými uhlíčitany (MCFC)
- S tuhými oxidy (SOFC)

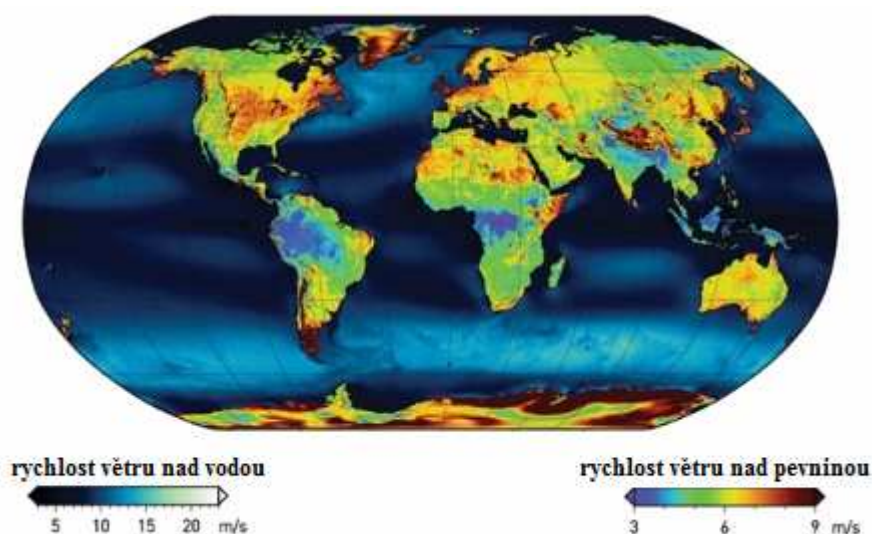
Typ paliv. článku	AFC	PEM	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolyt	KOH/H <sub>2</sub> O	polymer	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	roztavené soli	pevné oxidy
Provozní teplota (°C)	80 až 200	80	190	650	1000
Palivo	vodík	vodík/reformát	vodík/reformát	vodík/reformát	vodík/oxid uhelnatý/reformát
Reforming	-	externí	externí	externí/interní	externí/interní
Oxidant	kyslík/vzduch	kyslík/vzduch	kyslík/vzduch	kyslík, oxid uhličitý, vzduch	kyslík/vzduch
Účinnost (%)	40 až 50	40 až 50	40 až 50	více než 60	více než 60
Výkonová oblast	0,1 až 20 kW	0,1 kW až 20 MW	200 kW až 10 MW	více než 100 MW	více než 100 MW
Aplikace	kosmické	mobilní, malé teplárny	malé teplárny	teplárny, elektrárny	teplárny, elektrárny

Tab. 2: Charakteristiky palivových článků [31].

## 7. Statistické vyhodnocení rychlosti větru a výpočet větrného výkonu

Je zcela zřejmé, že v každé části Země jsou odlišné klimatické podmínky. Rozdílnými parametry jsou teplota, tlak, doba a intenzita slunečního svitu, rychlost a síla větru, nadmořská výška atd. Všechny tyto hodnoty do určité míry ovlivňují vhodnost využití konkrétní lokality pro výstavbu větrné elektrárny, a proto je nutné je zahrnout i do výpočtů. Názornou ukázkou může být větrná mapa světa na obr. 18 z roku 2005.

Vítr vnímáme jako pohyb vzduchu. Zemský povrch je v různých oblastech ohříván slunečním zářením nestejně. To má za následek rozdíly v atmosférickém tlaku, které jsou příčinou vzniku větru. Čím jsou rozdíly tlaku větší, tím silnější vane vítr. Rychlost, tedy síla větru je pro nás jedním z nejdůležitějších parametrů, můžeme ji určit pomocí Beaufortovy stupnice nebo změřit anemometrem. Hlavní jednotkou rychlosti větru je  $\text{m.s}^{-1}$ .



Obr. 18: Větrná mapa světa v 80ti metrech nad mořem [28].

### 7.1. Statistické vyhodnocení

Jako vstupní data pro vlastní výpočet výstupního výkonu větrné elektrárny nám poslouží naměřené hodnoty uvedené v tab. 3. Ty byly získány ročním měřením v konkrétní lokalitě. Pro ulehčení výpočtu použijeme matematický program AutoCad, který nám poskytne potřebné funkce.

Budeme tedy vycházet z rychlosti větru  $u_i$  a jeho pravděpodobnostního zastoupení  $p(u_i)$  v měřeném období. Pravděpodobnost diskrétních rychlostí větru je definována vztahem (1),

$$p(u_i) = \frac{m_i}{n} \quad (1)$$

kde  $m_i$  je četnost výskytu rychlosti větru  $u_i$  a  $n$  je celkový počet měření.

Rychlost větru $u_i$ [m·s <sup>-1</sup> ]	Pravděpodobnost rychlosti větru $p(u_i)$ [-]	Weibullova funkce $Wb(u_i, c1, k1)$
0	0,0041	0,0000
1	0,0212	0,0286
2	0,0571	0,0491
3	0,0612	0,0684
4	0,0751	0,0759
5	0,0859	0,0826
6	0,0831	0,0852
7	0,0867	0,0843
8	0,0781	0,0806
9	0,0776	0,0747
10	0,0625	0,0674
11	0,0581	0,0592
12	0,0511	0,0509
13	0,0461	0,0427
14	0,0363	0,0352
15	0,0259	0,0283
16	0,0232	0,0224
17	0,0149	0,0174
18	0,0145	0,0132
19	0,0098	0,0099
20	0,0097	0,0073
21	0,0054	0,0053
22	0,0025	0,0037
23	0,0031	0,0026
24	0,0029	0,0018
25	0,0011	0,0012
26	0,0011	0,0008
27	0,0007	0,0005
28	0,0004	0,0003
29	0,0003	0,0002
30	0,0002	0,0001
31	0,0001	0,0001

Tab. 3: Hodnoty rychlosti větru a jejich výskyt v dané lokalitě.

Rozložení četnosti rychlosti větru budeme předpokládat podle funkce Weibullova pravděpodobnostního rozdělení, pomocí kterého můžeme vypočítat průměrný výkon. Weibullovo rozdělení se používá pro popis kolísání rychlostí větru a je zapsáno pomocí Mathcadu funkcí (2),



$$Wb(u_i, c, k) = \frac{k}{c} \left( \frac{u_i}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{u_i}{c} \right)^k} \quad (2)$$

kde důležitou roli hraje tvarový parametr  $k$  a stupnicový parametr  $c$ , který souvisí se střední hodnotou náhodné proměnné. Tyto dva parametry se na začátku výpočtu libovolně zvolí a poté vhodně dopočítají. Výpočtem sumy kvadrátu rozdílu naměřených hodnot od Weibullova rozdělení vyjádřenou funkcí (3) a dosazením těchto hodnot do funkce (4) tak získáme metodou nejmenších čtverců potřebné zmíněné parametry  $c1$  a  $k1$ .

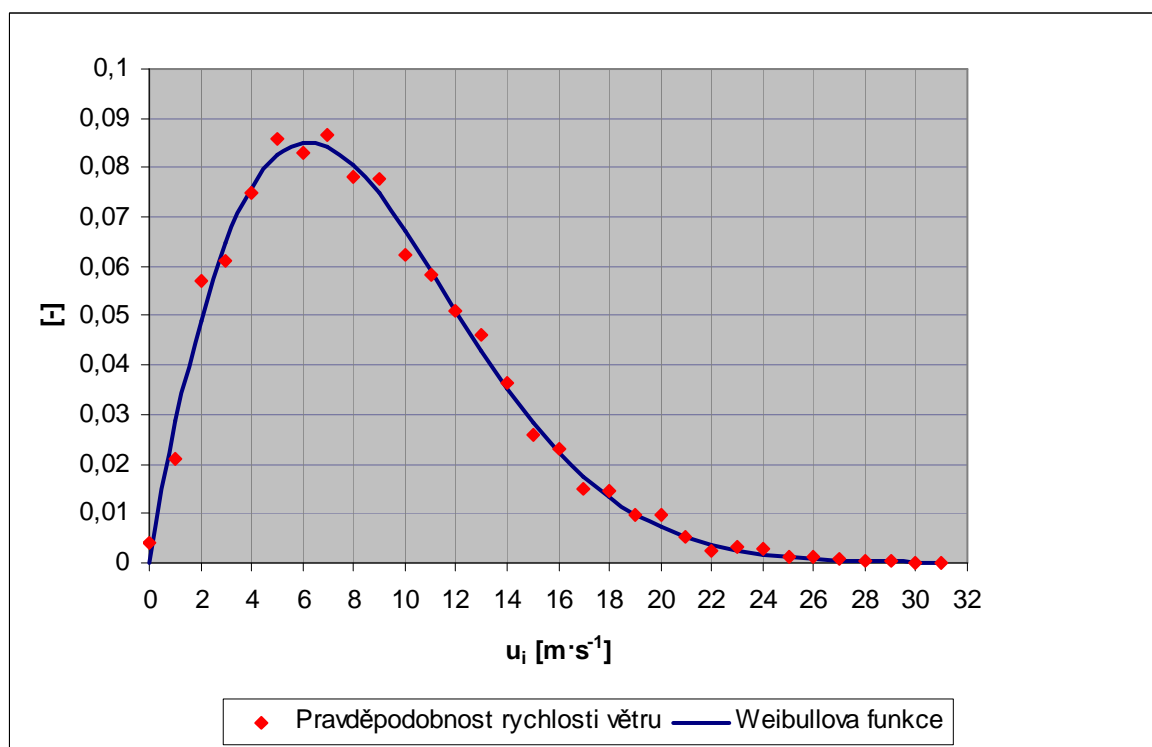
$$SSE(c, k) = \sum_i (p(u_i) - Wb(u_i, c, k))^2 \quad (3)$$

Kde  $i=1 \dots n$ ,  $n=31$ ,  $c=10$ ,  $k=1$ .

$$\begin{pmatrix} c1 \\ k1 \end{pmatrix} = \text{Minimize}(SSE, c, k) \quad (4)$$

$$c1 = 9,546 \text{ m.s}^{-1}$$

$$k1 = 1,838$$



Obr. 19: Graf naměřených hodnot aproximovaných Weibullovou funkcí.

Velikost parametru  $c1$  určuje polohu maxima funkce a je ve vztahu k průměrné rychlosti větru. Přibližně platí, že průměrná rychlost větru se vypočítá takto:  $v_{pr} = 0,88c1$

Pro výpočet kapacitního faktoru  $C_F$  použijeme funkci (5). Kapacitní faktor udává, jaká část energie je větru odebrána a přeměněna na mechanickou práci. Nabývá různých hodnot pro různé větrné motory, maximální dosažitelná hodnota je Betzova teoretická účinnost, která

má hodnotu 0,59. Dále ve vztahu vystupují parametry minimální a maximální rychlosti větru  $v_{min}$  a  $v_{max}$ , které byly získány od výrobce motoru.

$$C_F(v_{pr}, v_{min}, v_{max}, c1, k1) = -e^{-\left(\frac{v_{max}}{c1}\right)^{k1}} + \frac{e^{-\left(\frac{v_{min}}{c1}\right)^{k1}} - e^{-\left(\frac{v_{pr}}{c1}\right)^{k1}}}{\left(\frac{v_{pr}}{c1}\right)^{k1} - \left(\frac{v_{min}}{c1}\right)^{k1}} \quad (5)$$

Kde  $v_{pr}=9 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $v_{min}=5 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $v_{max}=13 \text{ m.s}^{-1}$ .

$$C_F(v_{pr}, v_{min}, v_{max}, c1, k1) = -e^{-\left(\frac{13}{9,546}\right)^{1,838}} + \frac{e^{-\left(\frac{5}{9,546}\right)^{1,838}} - e^{-\left(\frac{9}{9,546}\right)^{1,838}}}{\left(\frac{9}{9,546}\right)^{1,838} - \left(\frac{5}{9,546}\right)^{1,838}}$$

$$C_F = 0,385$$

Průměrný výkon větrného motoru pak vypočteme podle vztahu (7). Nejprve je však nutné vypočítat hustotu vzduchu  $\rho$  pro podmínky v dané lokalitě ze vztahu (6). Parametry jako je průměr rotoru  $D$  a další údaje potřebné k výpočtu byly převzaty z katalogového listu zvolené VTE W2000 93 TCIIIB, některé z nich jsou uvedeny v tab. 4.

<b>Průměr rotoru</b>	93,02 m
<b>Plocha rotoru</b>	6 793 m <sup>2</sup>
<b>Počet listů</b>	3
<b>Rozsah otáček</b>	11–18 ot./min.
<b>Jmenovité otáčky</b>	15,7 ot./min.
<b>Jmenovitá rychlost větru</b>	11 m/s
<b>Typ generátoru</b>	Synchronní
<b>Jmenovitý výkon</b>	2 000 kW
<b>Účinnost převodovky a generátoru</b>	93 %

Tab. 4: Vybrané technické parametry zvolené větrné elektrárny.

$$\rho(p, t) = \frac{p}{r(273,15 + t)} \quad (6)$$

Kde  $p$  je tlak vzduchu v dané lokalitě (101,3 kPa) při okolní teplotě  $t$  (12 °C) a  $r$  je plynová konstanta vzduchu (0,287 kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>).

$$\rho(p, t) = \frac{101,3}{0,287(273,15 + 12)}$$

$$\rho(p, t) = 1,238 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$P_{pr}(\rho, C_F, D, v_{pr}, \eta) = \frac{1}{8} \pi D^2 \rho C_F v_{pr}^3 \eta \quad (7)$$

Kde,  $\eta$  je celková účinnost mechanických částí (0,94).

$$P_{pr}(\rho, C_F, D, v_{pr}, \eta) = \frac{1}{8} \cdot 3,14 \cdot 93,02^2 \cdot 1,238 \cdot 0,385 \cdot 9^3 \cdot 0,94$$

$$P_{pr} = 1,11 \text{ MW}$$

Průměrný výkon VTE je tedy při zadaných podmínkách 1,11 MW.

Dále můžeme vypočítat rychloběžnost  $\lambda$  podle vztahu (8), udávanou poměrem mezi rychlostí konce listu a rychlostí větru. Rozeznáváme tak rotory rychloběžné a pomaloběžné. Pro porovnání jednotlivých rotorů se v literatuře objevují grafy popisující závislost kapacitního faktoru na rychloběžnosti.

$$\lambda = \frac{n \pi D}{v_{pr} 60} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{15,7 \cdot 3,14 \cdot 93,02}{9 \cdot 60}$$

$$\lambda = 8,49$$

Kde  $n$  jsou otáčky rotoru (viz tab. 4). Pomocí těchto výpočtů se pro zvolenou lokalitu dají určit základní parametry VTE [32].

## 8. Vlastní návrh zařízení

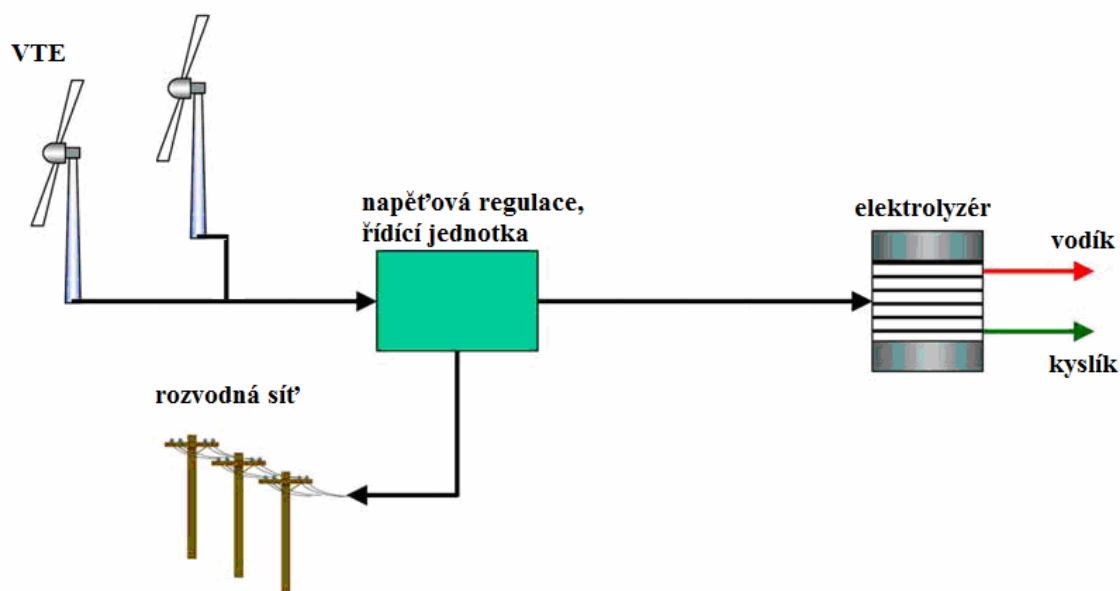
Návrh je koncipován podle scénáře popsaného v odstavci 6.6.3. kombinovaná výroba elektřiny a vodíku. Schematické propojení jednotlivých komponentů je na obr. 20.

### 8.1. Schéma sestavy a volba komponentů

Jako zdroj energie byla zvolena VTE o instalovaném výkonu 2 MW. Statistickým vyhodnocením byl v dané lokalitě vypočten průměrný výkon elektrárny 1,11 MW. Při použití dvou takto velkých elektráren se dostaneme na hodnotu výkonu 2,22 MW. Účinnost větrných staveb se pohybuje okolo 55 %. Hodnota účinnosti není stanovena ku výkonu větru, nýbrž podílem průměrného výstupního a instalovaného výkonu.

Výstupní elektrický výkon VTE je regulován a ovládán v řídicí jednotce. Jejím úkolem je reagovat na požadavky dodávek elektrické energie do rozvodné sítě nebo elektrolyzáru. Ztráty výkonnou elektronikou dosahují maximálně 7 %.

Elektřina je vyráběna a posílána do sítě pouze za ekonomicky výhodnějšího tarifu v době špičky. V případě omezené poptávky nebo mimo období špičky je vyráběn elektrolyticky vodík. Zvolený alkalický elektrolyzáru pracuje při atmosférickém tlaku s účinností 80–90 %. Využívá bipolární technologii, dokáže tak vyprodukovat 10–485 Nm<sup>3</sup> plynného vodíku za hodinu, což je při tlaku 101,3 kPa a teplotě 20 °C 0,8–41 kg/h. Velikost se reguluje přidáváním nebo odebíráním stupňů (provedení jako kalolis). Výhodou je nízká spotřeba energie 4,3 kWh·Nm<sup>-3</sup> vodíku. S takovou spotřebou vyžaduje zdroj o velikosti 43–2086 kW.



Obr. 20: Schéma zvolené sestavy.

Vodík je dále možné uskláňovat v tlakových nádobách nebo rozvádět potrubím na větší vzdálenosti. Zpětná výroba elektřiny není v tomto konceptu zohledněná, neboť se počítá s dopravou na větší vzdálenost, kde je možné tento zdroj energie jakkoli využít.

Životnost celého systému je ovlivněná především životností VTE, která se udává na 20 let.

## 8.2. Ekonomika

Náklady na výstavbu VTE jsou ovlivněny lokalitou, terénem, dostupností techniky, stavebními pracemi, projektem a v neposlední řadě cenou samotného díla. V úvahu je také nutno vzít počet provozních hodin VTE během roku, který se pohybuje v podle lokality 2 000–3 000 hodin ročně. S rostoucím ročním využitím elektrárny klesají i investiční náklady. Udává se, že elektrárny vybudované ve vnitrozemí dosahují zhruba polovičních pořizovacích nákladů než elektrárny na moři. Výstavba jedné VTE ve vnitrozemí přijde na 1 300 €/kW instalovaného výkonu. S rostoucím počtem elektráren pořizovací náklady klesají. Náklady na údržbu a provoz elektrárny jsou cca 5 % z celkových investičních nákladů.

Dalším zařízením je elektrolyzátor, jehož náklady jsou 840 €/kW, kde není započtena cena za vodu potřebnou k vlastní výrobě vodíku. Investiční náklady do navrhovaného zařízení jsou vyčísleny v tab. 5.

V navrhovaném systému nepočítáme s akumulací vodíku, tedy ani se zásobníky na jeho skladování. Náklady na nízkotlaký zásobník umístěný v tubusu VTE jsou zhruba 4,2 €/kWh. Použitím tlakového zásobníku na plyný vodík se náklady zvýší na 70 €/kWh. V tomto případě je nutné počítat i s náklady na potřebný kompresor, které činí 140 €/kW. Pokud chceme vodík distribuovat pomocí potrubního vedení, jako zemní plyn, náklady na plynovod jsou 0,45–1,4 mil.€/km. V případě zařazení akumulace do sestavy je tedy na místě vyčíslit náklady na palivový článek. Podle použitého PČ se ceny pohybují okolo 840 €/kW, stejně jak je tomu u elektrolyzátoru.

Zařízení	Náklady v €/kW	Náklady v mil.€
VTE	2 600	10,40
Elektrolyzátor	840	1,9

Tab. 5: Náklady na navrhované zařízení.

Vyrobením  $400 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1} \text{ H}_2$ , což je asi 36 kg, jsme schopni nahradit 100 litrů nafty vyrobené z ropy.

Ekonomika nezávisí jen na výrobních nákladech na turbínu a elektrolyzátor, ale i na jejich hospodárném provozu podmíněném danou lokalitou, tedy na správné celkové konfiguraci celého systému. V úvahu musí být vzaty i náklady na konkurenceschopné technologie.

## 9. Závěr

Spotřeba elektrické energie je ve velkém měřítku závislá na klimatických podmínkách (léto, zima), jak je možné pozorovat z grafu na obr. 7. Tyto změny jsou však v řádech týdnů či měsíců, jsme tedy schopni na ně pohotově reagovat. Horší případ nastává s regulací denní spotřeby elektřiny, kde se vyžaduje pohotová regulace výkonu zdrojů v řádech i několika sekund. Pokud je v síti energie nadbytek, některé zdroje je nutné vypnout, nebo elektřinu co nejefektivněji akumulovat.

Akumulace elektrické energie je v současné době velkým problémem. Nejsme schopni skladovat elektřinu ve velkém měřítku bez pomoci převodu na jiný druh energie. Nejlepším dosavadním způsobem akumulace jsou přečerpávací vodní elektrárny. Jsou rozšířeny a využívány po celém světě. Jejich výhody jsou účinnost, jednoduchost, rychlá ekonomická návratnost, dlouhá životnost a spolehlivost. Nevýhodou pro jejich další plánované budování je málo vhodných lokalit, náročná výstavba, odpor ekologů a veřejnosti z důvodu narušení krajinného rázu. Vhodnost těchto staveb je především ve spojení s velkými energetickými celky, jako jsou jaderné a tepelné elektrárny. V zařazení s VTE je realizace také možná, výhodná je však pro velké větrné farmy.

Co se týče setrvačnickové akumulace, její předností je rychlá odezva na požadavek elektřiny, proto nachází své uplatnění při náhlých výpadcích proudu, kdy zabezpečuje chod zařízení před sepnutím záložních zdrojů (naftových nebo benzinových generátorů). Spojením více kusů lze získat velký výkon pro krytí nestabilní frekvence elektrického proudu způsobeného náhlou změnou povětrnostních podmínek.

Elektrochemické akumulátory typu Pb, NiCd, LiIon, NiMH, NiFe, Zn-vzduch jsou dobrými zdroji energie pro mobilní přístroje, elektrické nářadí atd. Všechny články lze sériově řadit a získávat tak napěťové hladiny v řádech desítek i stovek voltů. Velkou nevýhodou těchto velkých sestav je jejich pořizovací cena. Uplatnění nacházejí u větrných mikroelektráren nebo jako UPS. Jiný pohled vnáší na svět elektrochemický článek NaS. Použití těchto článků roste s počtem alternativních zdrojů energie, nutností jejich stabilizace a akumulace.

Superkondenzátory se používají jako UPS, tedy zdroje, které dokáží dodávat velké množství energie v krátkém čase. Dokáží se rychle nabíjet, čehož je využíváno v automobilovém průmyslu. Při brzdění se akumulátor nabíjí a při rozjezdech nebo stoupání energii využívá. Nasazení ve velké energetice a rovnání se například PVE není v tuto chvíli ani možné.

Akumulace technologií CAES se zdá být jako zdárný směr. Při navrhování jsme omezeni lokalitou, kde potřebujeme vhodnou kavernu. Podle některých zdrojů je CAES schopná konkurovat PVE.

Energie uložená ve formě tepla se používá především ve spojení s fototermitickými panely s použitím ORC pro vytápění objektů nebo k výrobě elektřiny. Ukládání energie větru do tepla není příliš běžné.

Článek týkající se vodíkového hospodářství by měl dostatečně poskytnout představu o dané problematice, ať už se jedná o výrobu, skladování, transport nebo použití. Podle různých sestav zapojení zařízení je možné vyrábět vodík i elektřinu, nebo k výrobě vodíku používat i energii ze sítě a tak ji akumulovat.

Na dnešním trhu je k dostání nemalý výběr elektrolyzérů o rozdílných výstupních i vstupních parametrech. Velkou část tvoří elektrolyzéry menších výkonů na střídavý proud. Slouží především pro připojení do rozvodné sítě. Pro vlastní proces elektrolýzy je však potřeba proud stejnosměrný, obsahují tedy potřebné AD/DC měniče.

Vyhodnocením rychlosti větru byla zjištěna průměrná rychlost větru  $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Následným dosazením vypočtených hodnot tvarového a stupnicového parametru (1,838 a  $9,546 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) do funkce (5) dostaneme hodnotu kapacitního faktoru 0,385. Při tomto kapacitním faktoru a účinnosti mechanických částí 94 % je pak reálný průměrný výkon instalované 2 MW elektrárny 1,11 MW. Rychloběžnost vrtule je 8,49.

Samotný návrh stanice byl volen tak, aby produkoval elektrickou energii v době poptávky ve špičkových časech a mimo špičku vyráběl vodík pro jakékoliv další použití. Zdrojem jsou dvě VTE o celkovém instalovaném výkonu 4 MW, jejich průměrný výstupní výkon je tedy 2,22 MW. K tomuto zdroji byl navržen alkalický atmosférický elektrolyzér, který dokáže podle vstupního výkonu vyrobit  $10\text{--}485 \text{ Nm}^3$  plynného vodíku za hodinu, což je asi 0,8–41 kg/h (tlak 101,3 kPa, teplota 20 °C). Ekvivalentní množství nafty vyrobené z ropy by pak odpovídalo cca 2,22–113,9 litrům.

Investiční náklady na instalovaný výkon větrné elektrárny byly odhadnuty na 10,40 mil.€ a na elektrolyzér 1,9 mil.€.

Výroba vodíku a jeho další využití ať už jako akumulace energie nebo v dopravě z OZE je v současné době stále ve fázi. Cena vodíku vyrobeného VTE je tak ve srovnání s běžnými palivy značně vysoká. Během deseti následujících let by se však cena měla snížit, provoz a výroba vodíku by se stala mnohem efektivnější než dosud. Snížení ceny se předpokládá z důvodů úbytku zásob fosilních paliv, čímž jejich cena vzroste.

## 10. Seznam použité literatury

- [1] SCHULZ, H. Savoniův rotor. Ostrava-Plesná : HEL, 2005. 77 s.
- [2] Setův svět [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Rotory. Dostupné z WWW: <<http://www.repofium.net/sx/vn/rotory2.html>>.
- [3] QUASCHNING, Volker. Obnovitelné zdroje energií. Praha : GRADA, 2010. 296 s.
- [4] Osman Midilli [online]. 2009 [cit. 2011-05-16]. 15 Alışılmamış Rüzgar Türbini Tasarımları. Dostupné z WWW: <<http://osman.midilli.com>>.
- [5] Magenn Power Inc. [online]. 2008 [cit. 2011-05-16]. About. Dostupné z WWW: <<http://www.magenn.com/about.php>>.
- [6] MOTLÍK, Jan, et al. Obnovitelné zdroje energie. Praha : ČEZ, 2007. 184 s.
- [7] SPVEZ [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Větrné elektrárny. Dostupné z WWW: <<http://www.spvez.cz/pages/vitr.htm>>.
- [8] Oceanpowermagazine [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. REpower Systems AG Signs 295 MW contract for Thornton Bank Offshore Wind Farm. Dostupné z WWW: <[www.oceanpowermagazine.net/?p=2781](http://www.oceanpowermagazine.net/?p=2781)>.
- [9] ČSVE [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Z čeho se skládá větrná elektrárna. Dostupné z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/detail-kategorie/z-ceho-se-sklada-vetrna-elektrarna/82>>.
- [10] Systémy regulace [online]. 2010 [cit. 2011-05-16]. W.E.B větrná energie. Dostupné z WWW: <[http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie\\_9/systemy-regulace\\_27](http://www.vetrna-energie.cz/energie-zivlu/vetrna-energie_9/systemy-regulace_27)>.
- [11] Energetika v ČR [online]. 2009 [cit. 2011-05-16]. ČEZ. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-v-cr.html>>.
- [12] Energetický regulační úřad [online]. 2010 [cit. 2011-05-16]. Roční zprávy o provozu. Dostupné z WWW: <<http://www.eru.cz/>>.
- [13] ČEPS [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Grafy spotřeby. Dostupné z WWW: <<http://ceps.cz/>>.
- [14] Tzbinfo [online]. 13.8.2010 [cit. 2011-05-16]. Energetická burza a cena elektřiny. Dostupné z WWW: <<http://energie.tzb-info.cz/energeticka-politika/6705-energeticka-burza-a-cena-elektriny>>.
- [15] ŠEFTER, J.I. Využití energie větru. Praha 1 : SNTL, 1991. 266 s.



- [16] Vodní a tepelné elektrárny [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Význam vodních elektráren. Dostupné z WWW: <<http://www.vodni-tepelne-elektrarny.cz/vyznam-vodnich-elektraren.htm>>.
- [17] Energyweb [online]. 2002 [cit. 2011-05-16]. PŘEČERPÁVACÍ VODNÍ ELEKTRÁRNA. Dostupné z WWW: <<http://www.energyweb.cz/web/index.php>>.
- [18] Green Power Island Denmark. Dánsko : GOTTLIEB PALUDAN ARCHITECTS, 2010. 19 s.
- [19] ARSENEAUX, Jim. Beacon Power 20 MW Frequency Regulation Plant. USA : BeaconPower, 2010. 42 s.
- [20] Technický týdeník [online]. 2009 [cit. 2011-05-16]. Průlom do skladování elektřiny?. Dostupné z WWW: <<http://www.techtydenik.cz>>.
- [21] Energyweb [online]. 2002 [cit. 2011-05-16]. OLOVĚNÝ AKUMULÁTOR. Dostupné z WWW: <<http://www.energyweb.cz/web/index.php>>.
- [22] Britannica [online]. 2011 [cit. 2011-05-16]. Lead-acid storage battery. Dostupné z WWW: <<http://www.britannica.com/>>.
- [23] Jak uložit energii. Klasická energetika a fyzika [online]. 8.6. 2006 , 5, [cit. 2011-05-16]. Dostupný z WWW: <<http://3pol.cz/470-jak-ulozit-energii>>.
- [24] SHPEGS [online]. 2007 [cit. 2011-05-16]. Compressed Air Wind Electrical Generation System. Dostupné z WWW: <<http://www.shpegs.org/cawegs.html>>.
- [25] Technet [online]. 28.1. 2008 [cit. 2011-05-16]. Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. Dostupné z WWW: <<http://technet.idnes.cz/technet.aspx>>.
- [26] DLOUHÝ, Petr; JANÍK, Luděk. Česká vodíková technologická platforma [online]. 25.1.2007 [cit. 2011-05-16]. Vodíkové hospodářství. Dostupné z WWW: <<http://hytep.cz/>>.
- [27] ŠVÁB, Michal. Trendy ve vývoji vodíkového hospodářství. Praha : ČEA, 2006. 85 s.
- [28] La informacion [online]. 2005 [cit. 2011-05-16]. Mapas de disponibilidad de recursos renovables. Dostupné z WWW: <<http://www.lainformacion.com/>>.
- [29] SHERIF, S.A; BARBIT, F; VEZIROGLU, T.N. Wind energy and the hydrogen economy—review of the technology. USA : Solar Energy, 2005. 14 s.
- [30] Hfcletter [online]. 7. 2004 [cit. 2011-05-16]. GHW Presents Advanced Pressurized Alkaline Electrolyzer at HYFORUM. Dostupné z WWW: <[http://www.hfcletter.com/issues/XIX\\_7/stories/141-1.html](http://www.hfcletter.com/issues/XIX_7/stories/141-1.html)>.

- [31] KADRNOŽKA, Jaroslav. Energie a globální oteplování. Brno : VUTIUM, 2006. 189 s.
- [32] RYCHETNÍK, V; JANOUŠEK, J; PAVELKA, J. Větrné motory a elektrárny. Praha 6 : ČVUT, 1997. 199 s.

## 11. Seznam symbolů

symbol	význam	jednotka
$c, cI$	stupnicový parametr	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$C_F$	kapacitní faktor	-
$d, D$	průměr rotoru	m
$k, kI$	tvarový parametr	-
$m_i$	četnost výskytu	-
$n$	počet měření	-
$\eta$	účinnost	-
$p$	pravděpodobnost zastoupení	-
$p$	tlak	Pa
$P_{pr}$	průměrný výkon	W
$r$	plynová konstanta	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$\rho$	hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$t$	teplota	$^{\circ}\text{C}$
$u_i$	rychlost větru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_{pr}$	průměrná rychlost větru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_{max}$	maximální rychlost větru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$v_{min}$	minimální rychlost větru	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$Wb$	Weibullova funkce	-

## 12. Seznam zkratek

AC	Alternating Current (střídavý proud)
CAES	Compressed Air Energy Storage (skladování en. ve stlačeném vzduchu)
ČR	Česká Republika
DC	Direct Current (stejnosměrný proud)
FVE	Fotovoltaická elektrárna
HTS	High Temperature Superconductor (vysokoteplotní supravodič)
KOH	Hydroxid draselný
LTS	Low Temperature Superconductor (nízkoteplotní supravodič)
MARS	Magenn Air Rotor System (systém vzduchového rotoru)
MHD	Městská hromadná doprava
ORC	Organic Rankin Cycle (organický Rankinův cyklus)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PČ	Palivový článek
PEM	Polymer Electrolyte Membrane (polymerový elektrolyt)
PME	Pressure Module Electrolyser (tlakový elektrolyzér)
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage (supravodivý magnetický zásobník energie)
TUV	Teplá užitková voda
UPS	Uninterruptible Power Supplies (zdroj nepřetržitého napájení)
VTE	Větrná elektrárna